

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INFILTRÓMETRO AUTOMÁTICO PARA EL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA DE LA UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA**



FABIO ANDRÉS PATERNINA MIRANDA

PAOLO ANCIZAR RODRÍGUEZ COMBATT

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA-CÓRDOBA

2019

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INFILTRÓMETRO AUTOMÁTICO PARA EL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA DE LA UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA**



FABIO ANDRÉS PATERNINA MIRANDA

PAOLO ANCIZAR RODRÍGUEZ COMBATT

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

ING. VALÉRY JOSÉ LANCHEROS SUÁREZ, M.Sc

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA-CÓRDOBA

2019

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 17, acuerdo No. 039 del 24 de junio de 2005 del Consejo Superior de la Universidad de Córdoba.

NOTA DE ACEPTACIÓN

VALÉRY JOSÉ LANCHEROS SUÁREZ

Director

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO

Jurado

ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARÍN

Jurado

DEDICATORIAS

A mi madre Norma Combatt, que con esfuerzo nos sacó adelante a mi hermana y a mí.

A mi hermana Johanna, quien siempre ha estado conmigo, sin ella no hubiese podido mantenerme en este proyecto.

A mi tía Carmen Combatt, que siempre me ha brindado su cariño.

A mi prima Tamy Combatt y a su esposo Sandro Vivero, dos personas que me acogieron en su hogar y brindaron todo su apoyo en este proyecto.

A mi novia Andrea Álvarez, que ha sido mi inspiración en los últimos meses para lograr concluir este trabajo.

Paolo Ancizar Rodríguez Combatt

Este trabajo investigativo se lo dedico primero que todo a Dios, a mis padres María Bernarda Miranda y Fabio Alberto Paternina, quienes me han dado todo el apoyo emocional para culminar mis estudios, y se han convertido en mi motor en cada una de mis metas y sueños. A mis grandes amigos que me han acompañado siempre Arnaldo, Carlos, John Paul, Guido y Andrés, por aconsejarme y haber creído en mi trabajo.

A mi novia Vanessa Samacá por su comprensión y apoyo incondicional en el transcurso de esta etapa de mi vida.

Fabio Andrés Paternina Miranda

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo y colaboración de varias personas. Principalmente queremos agradecerle al Ingeniero Valéry Lancheros por su guía como director.

Agradecemos al Ingeniero Teobaldi Mercado del programa de Ingeniería Agronómica, por brindarnos sus conocimientos en los temas concernientes a los estudios de suelos.

A los docentes del programa de Ingeniería Mecánica y a la Universidad de Córdoba por su apoyo y enseñanzas a lo largo de nuestra formación académica.

Agradecemos a todos nuestros amigos y familiares que nos acompañaron y apoyaron.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

Este proyecto se basó en el diseño y construcción de un infiltrómetro automatizado con el fin de obtener las mediciones necesarias para poder caracterizar variables hidráulicas del suelo, como la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}), labor que demanda bastante tiempo ya que los registros se toman en intervalos de periodo establecidos, que van de 1 a 5 minutos, por periodos de 1 a 5 horas, dependiendo del tipo de suelo a evaluar.

El equipo constó de un infiltrómetro automatizado de anillo doble que mediante un sistema de medición por ultrasonido, registró la variación en la columna de agua del anillo interior, cuando éste nivel llega a un punto determinado del suelo (100 mm aproximadamente), el sistema de rellenado del anillo se activa de forma automática, a partir de una electroválvula que se implementó dentro del diseño del dispositivo para garantizar que la prueba siguiera su curso sin necesidad de alteraciones exteriores por parte de un operario, esto hizo posible la obtención de datos, con una supervisión mínima por parte del operario.

La información recolectada, permite el mejoramiento en los modelos de conductividad hidráulica, la caracterización de suelos en la región y la elaboración de planes de riego y cultivo. Además, aportó al programa de Ingeniería Agronómica un equipo tecnológico que ayuda en el proceso de infiltración, cumpliendo así el objetivo de la investigación, debido a que facilitó el desarrollo de ésta actividad.

Palabras clave: Infiltrómetro automatizado, conductividad hidráulica, ultrasonido, electroválvula, infiltración y cultivo.

RESUMEN	VII
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo general	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. MARCO REFERENCIAL	19
3.1. Estado del arte	19
3.2. Marco teórico.....	33
3.2.1. Infiltración.....	33
3.2.2. Capacidad de infiltración	35
3.2.3. Ensayo de infiltración	36
3.2.4. Factores que afectan el proceso de infiltración	36
3.2.5. Infiltrómetro	38
3.2.6. Infiltrómetro de doble anillo	38
3.2.7. Obtención de datos en el proceso de infiltración.....	43
3.2.8. Infiltración y flujo de agua subterránea	44
3.2.9. Conductividad hidráulica	45
3.2.10. La ley de Darcy y el movimiento del agua en el suelo	46
3.2.11. Prueba chi-cuadrado	48
3.2.12. Arduino Uno.....	49
3.2.13. Electroválvula.....	50
3.2.14. Módulo microSD	52
3.2.15. Relevador o Relé	53
3.2.16. Ultrasonido	54
3.3. Marco Conceptual.....	56
3.3.1. Conductividad.....	56
3.3.2. Hidráulica	56
3.3.3. Sistematización.....	56

3.3.4. Suelo	57
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	58
4.1. Fase de documentación	58
4.2. Determinar parámetros de diseño	60
4.3. Diseño del infiltrómetro y sistema automatizado	65
4.4. Construcción y Ensamble.....	67
4.5. Realización de ensayos de campo.....	69
4.6. Validación	72
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
5.1. Determinar parámetros de diseño	73
5.2. Diseño del infiltrómetro y sistema automatizado	75
5.2.1. Selección componentes electrónicos	77
5.2.2. Consumo energético	78
5.2.3. Código.....	79
5.2.4. Diseño de la regadera.....	79
5.3. Construcción y Ensamble.....	82
5.4. Realización de ensayos de campo.....	85
5.5. Validación	87
6. CONCLUSIONES	91
7. RECOMENDACIONES	92
REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	93
WEBGRAFÍA	100
ANEXOS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Infiltrómetro de anillo doble (A) - Infiltrómetro de anillo doble -HM-4502 (B). Tomado de: www.directindustry.es y www.cotecno.cl	39
Figura 2: Arduino UNO R3 Con CH340. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016).....	50
Figura 3 Electroválvula 12V. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016).....	51
Figura 4 Lector de tarjetas microSD. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016)	52
Figura 5. Relé SRA-12VDC-CL de 20 ^a . Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016).....	53
Figura 6 Sensor de Ultrasonido HC-SR04 Arduino. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016).....	55
Figura 7. Suelo arenoso (A) - Suelo arcilloso (B) - Suelo húmico (C). Tomado de http://tomasbmultimediasbp.blogspot.com	57
Figura 8. Distribución del agua en un infiltrómetro de anillo doble. Recuperado de http://www.prosap.gov.ar	58
Figura 9. Infiltrómetro de doble anillo (A) - Infiltrómetro Truf-Tec (B). Tomado de: https://sp.eijkelkamp.com y https://www.turf-tec.com	59
Figura 10. Esquema del infiltrómetro con el dispositivo de automatización armado y montado en campo. Tomado de Chávez, G. (2009). Recuperado de https://www.researchgate.net	59
Figura 11. Estudiantes recolectando datos de forma manual, práctica de infiltración. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 12. Rellenado de los anillos de forma manual. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 13. Primer boceto para regadera. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 14. Segundo boceto de regadera. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 15. Boceto final para regadera. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 16. Diagrama de circuitos. 1) Electroválvula, 2) Relé, 3) Ultrasonido, 4) Lector SD, 5) Arduino, 6) Interruptor, 7) Batería. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 17. Anillos y placa de conducción. Fuente: Elaboración propia	69
Figura 18. Anillos y posicionamiento para la placa de conducción. Fuente: Elaboración propia	69
Figura 19. Montaje del dispositivo conectado al suministro de agua. Fuente: elaboración propia	70
Figura 20. Montaje completo del sistema. Fuente: Elaboración propia	70
Figura 21. Seguimiento en tiempo real del dispositivo. Fuente: Elaboración propia.....	71

Figura 22. Batería AKITA AKG2.5L Fuente: Elaboración propia	78
Figura 23. Diseño conceptual de la regadera. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 24. Simulation flujo en la regadera. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 25. Simulación agua a través de la regadera con acercamiento. Los números representan los orificios. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 26. Vista explosionada del dispositivo, Arduino UNO (A), Lector microSD (B), Sensor de ultrasonido (C), Relee (D), Electroválvula (E), Caja para exteriores (F), Tapa de caja para exteriores (G). Fuente: Elaboración propia	83
Figura 27. Montaje de los circuitos en la caja de exteriores. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 28. Orificios de salida para los puertos. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 29 Montaje de dispositivo y regadera. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 30. Curva de infiltración ensayo de campo suelo arenoso. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 31. Curva de infiltración ensayo de campo suelo húmico. Fuente: Elaboración propia	86
Figura 32. Curvas de infiltración. (a) Datos manuales estudiantes del programa de ingeniería agronómica, (b) Datos con dispositivo. Fuente: Elaboración propia.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de selección.....	64
Tabla 2. Volumen para suministro del relleno.....	73
Tabla 3. Promedio de llenado para anillo interior.	74
Tabla 4 Llenado anillo exterior.....	75
Tabla 5 Parámetros de diseño para el infiltrómetro.	75
Tabla 6. Resumen datos de ensayo piloto.	76
Tabla 7. Comparación sistemas de medida.	77
Tabla 8. Consumo energético de componentes electrónicos.....	78
Tabla 9. Distribución de caudal dentro de la regadera.....	81
Tabla 10. Distribución de flujo a través de los orificios de la regadera.....	82
Tabla 11. Prueba chi-cuadrado, datos dispositivo vs datos manuales en pruebas piloto suelo arenoso.	88
Tabla 11. Prueba chi-cuadrado, datos dispositivo vs datos manuales en pruebas piloto suelo arenoso.	89
Tabla 12. Prueba chi-cuadrado, datos dispositivo vs datos manuales en pruebas piloto suelo húmifero.	90

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Planos de la regadera en SOLIDWORKS.....	102
Anexo 2. Medidas de anillo interior en mm. Fuente: Elaboración propia.	103
Anexo 3. Medidas anillo exterior. Fuente: Elaboración propia.....	103
Anexo 4. Planos para el dispositivo de automatización. Fuente: Elaboración propia	104
Anexo 5. Resumen Datos dispositivo ensayo de campo en suelo arenoso. Fuente: Elaboración propia	105
Anexo 6 Código de automatización del dispositivo. Fuente: Elaboración propia.....	106
Anexo 7. Guía de uso y mantenimiento del Infiltrómetro automático. Fuente: Elaboración propia	108
Anexo 8. Manual de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia	110
Anexo 9. Datos prueba de campo con dispositivo, suelo humífero. Fuente: Elaboración propia.	111

ABSTRACT

In the present project an automated infiltrometer was designed and built in order to obtain the necessary measurements to be able to characterize soil hydraulic variables, this is a work that demands a lot of time since that the records are taken at established time intervals ranging from 1 to 5 minutes, for periods of 1 to 5 hours, depending on the type of soil to be evaluated.

The equipment consists of an automated double ring infiltrometer which, by means of an ultrasound measurement system, records the variation in the water column of the inner ring, when this level reaches a certain point on the ground (approximately 100 mm) the system is activated. Filling of the rings which, using an electrovalve, will allow the passage of water to return to the required level and the test can continue its course without the need for external alterations by the operator, this makes it possible to obtain data, with minimal supervision by the operator.

The information collected allows the improvement of hydraulic conductivity models, the characterization of soils in the region and the elaboration of irrigation and cultivation plans. In addition, it contributed to the Agronomic Engineering program a technological team that helps in the infiltration process, thus fulfilling the objective of the investigation, because it facilitated the development of this activity.

Keywords: Automated infiltrometer, hydraulic conductivity, ultrasound, electrovalve, irrigation, infiltration and cultivation plan

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, existen mejoras tecnológicas que permiten automatizar procesos cotidianos. Estos procesos ahorran tiempo y energía al hombre, tales como internet, las redes y la potencia computacional de los dispositivos que permiten generar nuevos servicios y aplicaciones que mejoran la calidad de vida de las personas. Actualmente aparecen nuevos dispositivos potentes y de bajo costo, y todos juntos, con los recursos y el conocimiento, hacen posible innovar y crear sistemas automatizados virtualmente para cualquier tipo de aplicación o servicio.

El presente proyecto pretendió diseñar y construir un sistema automatizado para un infiltrómetro de anillo doble para que sea empleado por los estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Córdoba, en el proceso de caracterización de los suelos; lo que responde al proceso de infiltración, con el cual se obtienen los datos que determinan la conductividad hidráulica de campo (K_{fs}), para después decidir el tipo de cultivo a sembrar en el terreno analizado.

Actualmente la caracterización completa de un terreno, dependiendo de su tamaño, puede tomar un gran número de ensayos, debido a que la conductividad hidráulica saturada de campo presenta alta variabilidad espacial implicando aumento en costos y tiempo respecto a la labor de asesoría ecológica por parte de un ingeniero. Debido a esto, se hizo necesario un equipo compacto y fácil de transportar que arroje datos con exactitud, puesto que los infiltrómetros cuentan con un sistema asistido que requiere de un operario constante que verifique y anote los datos arrojados en cuanto a las características del suelo. Por lo que se deben manejar muchas variables, especialmente la del tiempo

En el mercado se pueden encontrar varios modelos de infiltrómetros, sin embargo, estos modelos solo abarcan pequeñas partes de la superficie total, lo que obliga a realizar una mayor cantidad de ensayos, resaltando que algunos utilizan sensores sobre la superficie del agua, lo cual lleva a que se afecte la medición, generando que el proceso se realice nuevamente de forma manual.

Con el desarrollo del presente proyecto se pretendió tomar las mediciones de la variación en la columna de agua del anillo interior del infiltrómetro, a través de un sistema automatizado que cuenta con un sensor de ultrasonido, y un sistema de autorrellenado que mediante una regadera que se encuentra unida a una electroválvula, controla el caudal necesario para reestablecer los niveles de agua óptimos en el ensayo, asegurando que la superficie del suelo no se vea afectada por errores humanos. Con este sistema obtener de forma sencilla datos exactos que consten de un registro electrónico, brindando beneficios para el operario, en cuanto a economía y tiempo, pues evita costos de importación en equipos, y al facilitar un análisis confiable del conteo contribuye de forma eficaz al desarrollo tecnológico de la agricultura en la región.

Éste trabajo investigativo, está dividido en siete capítulos, los cuales responden a la construcción total del trabajo y todos los elementos requeridos para la sostenibilidad teórica, metodológica y conceptual del proyecto. El primer capítulo abarca la introducción. Seguidamente, se encuentran los objetivos del trabajo, El tercer capítulo, comprende el marco referencial, compuesto por el estado del arte, que son las distintas investigaciones enfocadas en éste mismo objeto de estudio, la automatización de infiltrómetros, el marco teórico son los referentes teóricos en los cuales se basó ésta investigación, y el marco conceptual apunta a las distintas nociones que se deben tener en cuenta al momento de interpretar este trabajo.

Consecutivamente, está el capítulo cuatro que consta del marco metodológico que se siguió en la investigación, se halla la descripción del diseño y construcción del infiltrómetro automatizado, se describen los distintos elementos que lo componen para su correcto funcionamiento. En el quinto capítulo, está la sección de análisis e interpretación de los resultados, aquí se detalla el impacto que tuvo la aplicación de la automatización de un infiltrómetro, y lo beneficioso que resultó para los estudiantes del programa de ingeniería agronómica al momento de efectuar el proceso de infiltración. Finalmente, está el sexto capítulo, el cual responde a las conclusiones, donde se determina de forma concisa lo logrado con la investigación, en el último capítulo, están de las recomendaciones en aras del mejoramiento y crecimiento del trabajo realizado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Diseñar, construir y validar un infiltrómetro automatizado para la caracterización y estudio de las propiedades de suelos, para el programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Córdoba.

2.2. Objetivos específicos

- Definir los parámetros para el diseño y construcción del infiltrómetro; con el fin de que éste cumpla con los requerimientos de la medición de los datos y el rellenado del anillo interior.
- Diseñar el infiltrómetro junto con el sistema de medición y distribución del agua; utilizando componentes electrónicos que permitan la automatización del proceso.
- Construir el infiltrómetro y validar los datos obtenidos por éste mediante pruebas de campo, utilizando como lugar de ensayo el campus de la Universidad de Córdoba.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. Estado del arte

Las investigaciones acerca del desarrollo y mejoramiento de las herramientas agronómicas han encontrado en la tecnología, métodos fehacientes a la hora optimizar las actividades del campo de enseñar. Los estudios encontrados poseen una estructura sólida de conocimientos sobre la naturaleza del proceso de infiltración, del empleo de las herramientas que se utilizan para ésta actividad y sobre las dificultades que se pueden encontrar en tal proceso. Por lo que, en los últimos años se le ha agregado a la agronomía un componente tecnológico, que consiste en automatizar, sistematizar una de las principales herramientas, que es el infiltrómetro de anillo doble, el cual requiere de un esfuerzo físico para ser manipulado. Hecho que condujo hacia el interés de sistematizar este aparato agronómico y brindar una innovación tecnológica al campo en pro de mejorar las tareas que en él se realizan.

Para el desarrollo de esta investigación, fue preciso conocer los distintos antecedentes de estudios realizados bajo la misma línea, para incrementar el grado de conocimiento respecto al objeto de estudio. Por lo que las investigaciones recopiladas, apuntan a un mismo objeto de estudio, la automatización de un sistema que facilite la medición del nivel de agua en la columna del anillo interior en aras de determinar la conductividad hidráulica; en el que el agua pasa de la superficie al interior del terreno, permitiendo conocer las características del suelo.

En primera instancia, se encuentra la investigación realizada por Chávez (2010), cuyo trabajo investigativo se denominó *Diseño Y Construcción De Un Infiltrómetro Automatizado Para Medición De Conductividad Hidráulica*, en el cual el dispositivo diseñado utiliza un sensor

de presión diferencial, siendo capaz de registrar las variaciones de altura de la columna de agua del contenedor principal. La señal obtenida por el sensor se acondiciona mediante un amplificador de instrumentación, de tal forma que las variaciones se puedan registrar. Para el desarrollo de ésta investigación se empleó un infiltrómetro portátil de carga constante y anillo sencillo, el cual es una variante de los descritos por Elrick y Reynolds (1992). Éste constó de una botella de Mariotte con un diámetro de 63.5 de plástico acrílico transparente (plexiglas), y al momento de automatizar este dispositivo su diseño se basó en tres partes, las cuales responden a un sensor de presión diferencial MPX2010DP (Motorola/ Free Scale Inc.), el cual es un circuito cerrado piezométrico que se compensa con temperatura. La segunda parte es un circuito de entrega de energía y acondicionamiento de señal, el cual es el encargado del mantenimiento del sensor constante y elimina las variaciones del voltaje, junto con un escalamiento de la señal del sensor, la fuente de alimentación de éste circuito fue una batería de 9 volts; en el que la tercera parte fue un dispositivo de almacenamiento de datos no volátil (datalogger) conocido como EL-USB-3, programable con un rango de recepción de 0 a 30 voltios. El dispositivo de almacenamiento se habilita para la adquisición y registro de datos en intervalos preprogramados que van desde un segundo hasta doce horas, lo que significa que posee una capacidad de almacenamiento que se aproxima a 32.500 registros. Esta automatización genera que la información analógica se digitalice y almacene en un formato de 10 bits.

Cabe resaltar, que éste dispositivo de automatización se programó para registrar información cada 1 y 10 segundos durante 10 minutos, al momento de ejecutar la medición de eficiencia de la unidad de automatización, lo que implica que la programación del mismo se desarrolla de forma externa por medio de una computadora, dándole libertad al operario de especificar

durante cuánto tiempo desea desarrollar el proceso de infiltración. Al finalizar la investigación, se determinó que el dispositivo de automatización permitió obtener datos bajo una supervisión mínima, reduciendo así la demanda de tiempo y esfuerzo; facilitando la obtención de información para la caracterización de las propiedades hidráulicas de los suelos. Del mismo modo, el estudio determinó que no se presentaron diferencias significativas entre los datos calculados mediante las mediciones manuales y las automatizadas, y como aporte final, el estudio logró especificar que el dispositivo diseñado es capaz de medir una columna de agua entre 0 y 850 mm, con un error aproximado de 2 mm.

El autor anterior también había realizado anteriormente otra investigación de éste tipo junto con Alberto F. Gómez–Tagle R., Batlle–Sales, Zepeda, Guevara, Maldonado y Pintor, en el 2008, cuyo título es *Conductividad Hidráulica Saturada De Campo: Uso De Un Infiltrómetro De Carga Constante Y Anillo Sencillo*, estudio que tuvo como objetivo construir un infiltrómetro ligero, asequible y que redujera en mayor medida el consumo de agua. El trabajo se realizó en los suelos del cinturón volcánico mexicano, en las formaciones de arena Huiramba, en la arena Jorullo, en limo Umécuaro, franco Cointzio y arcilla Atécuaro y buscó probar la diferencia estadística entre éste dispositivo creado y un aparato comercial de referencia, al mismo tiempo que se determinaba la sensibilidad del dispositivo para detectar diferencias en la conductividad hidráulica saturada relacionadas con variaciones de textura del suelo para utilizarlo en estudios de variación espacial de ésta Conductividad Hidráulica K_{sf} , con énfasis en suelos de difícil acceso y no dedicados a la agricultura. Se empleó un infiltrómetro portátil de carga constante y anillo sencillo (IPCCAS), el cual consta de tres partes que son un reservorio principal, un anillo y una base de soporte. A diferencia de la investigación que se realizó años después, reseñada al inicio, en este estudio únicamente

se propuso el diseño de un infiltrómetro, más no se había considerado la idea de automatizarlo hasta un año después, que los investigadores determinaron que no solo se podía diseñar un infiltrómetro de fácil traslado, sino que éste podía ser automático, en la medida de que los datos se midieran y se registraran de forma tecnológica; lo que evidencia cómo un objeto de estudio puede generar otra problemática, en el que ambos objetos se relacionan entre sí, generando que una de las investigaciones se convierta en el referente teórico de la otra.

Los resultados obtenidos del estudio realizado en el año (2008) reflejaron que el funcionamiento del infiltrómetro portátil de carga constante y anillo sencillo, fue adecuado y que las soluciones matemáticas planteadas, comparadas con un equipo de referencia (permeámetro de Guelph), no presentaron diferencias estadísticas significativas en la mayoría de los casos. Así mismo, se detectó una dependencia de la textura, donde los suelos más gruesos (arenas Jorullo y Huiramba) presentaron los valores más elevados de conductividad hidráulica (K_{fs}), mientras que los de texturas más finas (limo Umécuaro, suelo franco Cointzio y arcilla Atécuaro) mostraron valores menores; en el que los valores más bajos de conductividad hidráulica se obtuvieron en la arcilla Atécuaro. Lo que implica que el diseño ligero de éste tipo de infiltrómetro no afectó el análisis estadístico de los suelos, arrojando resultados óptimos y reales.

Bajo éste mismo objeto de estudio, se encuentra la investigación realizada por Amézketa, Gazol, y Aragüés (2002), al cual tiene como nombre: *Desarrollo de un infiltrómetro automático y su aplicación en campo*. éste trabajo presentó el desarrollo de un nuevo infiltrómetro automático (IA) de campo y su aplicación al análisis de la infiltración característica de siete suelos de la cuenca media del Ebro, ubicada en el noreste de la Península Ibérica (España).

Se construyeron 18 Infiltrómetros Automatizados, en el que el 94 % de los errores entre los valores computados y medidos manualmente fueron inferiores a 0.6 mm, y el 100 % inferiores a 1 mm. Además, Cinco suelos presentaron infiltraciones finales (IF) moderadamente lentas (entre 18 y 6 mm h⁻¹), consideradas adecuadas para el riego por superficie, y los suelos restantes presentaron Infiltraciones Finales lentas (menores a 4 mm), siendo insuficientes para el riego por superficie y con un riesgo elevado de encharcamiento, escorrentía y erosión.

La infiltración de estos suelos se vio afectada por su encostramiento superficial, por el origen químico o físico del sellado superficial y por la baja permeabilidad de algunos de los horizontes sub-superficiales. Aun así, las conclusiones generales de éste trabajo señalaron que el infiltrómetro automatizado es una excelente herramienta de trabajo para la cuantificación en campo de la infiltración del agua en el suelo. Esto porque, cabe resaltar que éste sistema automatizado de medida de infiltración en campo o infiltrómetro automático (IA) fue desarrollado por la Unidad de Suelos y Riegos del SIA-DGA en colaboración con el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA). Razón por la que el total de unidades construidas fue de 18, en el que cada dispositivo estuvo compuesto por un cilindro o anillo metálico simple conectado a un depósito de agua sobre el que reposaba una caja que registraba y almacenaba el descenso del nivel de agua en el depósito. El anillo de infiltración (anillo de Muntz) fue un cilindro de hierro de 240 mm de diámetro y 400 mm de altura, con el contorno inferior biselado para facilitar su introducción en el suelo hasta una profundidad de unos 5 mm. En la parte superior interna de la pared lateral se instaló un sistema válvula-boya (similar al existente en las cisternas de los inodoros) mediante el que se impuso un calado o carga hidráulica constante de unos 10 mm. Incluso, contaba con una válvula que se conectó

mediante un tubo de goma a un depósito de agua de PVC, de 1 m de altura y 45 L de capacidad. Conforme el agua contenida en el anillo infiltraba en el suelo, el nivel de agua en el depósito disminuía. Descenso que fue medido con una boya flotante conectada por medio de un hilo inelástico a una polea solidaria con un encoder o contador de pulsos instalado en la caja registradora colocada sobre el depósito. El giro de la polea producido por el descenso de la boya conforme descendía el nivel de agua en el depósito era detectado por dicho encoder, que generaba 500 pulsos por cada vuelta completa de polea, el cual contabiliza los pulsos producidos a lo largo del ensayo.

La caja registradora contiene además, un circuito electrónico que almacenaba los pulsos medidos, y contaba con una batería recargable de 4 Ah que alimenta tanto al contador de pulsos como al circuito electrónico. A partir de los pulsos registrados y de la calibración del sistema (en la que, considerando el diámetro de la polea, se establece el número de pulsos que corresponden a un milímetro de altura de agua) se realiza la conversión automática de pulsos a mm de descenso del nivel de agua en el depósito. Los datos recogidos se almacenaron en una memoria no volátil (memoria EPROM). En este sentido, el consumo total del sistema fue de 30 mA, por lo que la autonomía teórica de la batería es de unas 130 horas. Sin embargo, según la hoja de características del encoder, su consumo es variable y puede llegar a duplicarse, lo que significa que la autonomía del sistema puede reducirse a la mitad. Los datos fueron computados y visualizados mediante un programa desarrollado a tales efectos, el programa proporcionó para cada uno de los infiltrómetros Automatizados, el tiempo acumulado y la infiltración acumulada, a partir de los cuales se calculó la evolución de la infiltración instantánea a lo largo del ensayo. La comprobación del funcionamiento y el grado de precisión de cada uno de los 18 Infiltrómetros Automatizados construidos se realizó

comparando los valores computados con lecturas manuales. Para ello, se dispuso un depósito de agua con un orificio en su base al que se conectó un tubo de tygón transparente de 4 mm de diámetro interior acercado verticalmente a la pared exterior del depósito. El descenso del nivel de agua en dicho tubo se midió periódicamente con una regla milimetrada, y se comparó con el descenso computado por cada Infiltrómetros Automatizado. Es así, como a partir de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que se aplicó para cada uno de los Infiltrómetros Automatizado; estableció que no hay diferencias significativas, arrojando un nivel de confianza del 95 %, entre los datos de infiltración obtenidas de forma manual y las conseguidas automáticamente. Resultado que determinaron que cada infiltrómetro funcionó correctamente, presentando errores de lectura de 1 mm, lo que implicó una precisión eficiente.

Cerquera, López, y Ramos, (2010) en su trabajo, *Diseño de un sistema electrónico digital para automatizar la prueba de capacidad de infiltración del suelo en campo*, desarrollado bajo los parámetro de investigación de la Universidad Surcolombiana en Neiva, éste artículo plantea el desarrollo de un sistema electrónico digital que automatiza el método de infiltrómetro de anillos, utilizado para obtener la capacidad de infiltración del suelo. Por medio de un sensor ultrasónico de distancia, el cual tiene la función de observar la lámina de agua durante el desarrollo de la prueba. De igual manera, se utiliza una electroválvula junto a un tanque abastecedor, encargados de realizar el proceso de recarga de la lámina de agua para que el nivel se mantenga constante.

El manejo de estos elementos se realiza a través de una tarjeta de control que posee como elemento central un microcontrolador dsPIC, entendido como un controlador digital de señales. En lo que respecta a la recopilación de los datos, el análisis e interpretación de los

mismos, la prueba se desarrolló a través de un software denominado InfilSuelos V. 1.0, diseñado en el entorno de programación de Visual Basic 6.0 con el que se crea un entorno gráfico amigable y fácil de manejar. Para comprobar la efectividad del prototipo automatizado se efectuaron tres pruebas en distintos sitios, buscando variedad en el tipo de suelo. Al comparar las tablas de datos recogidos entre el proceso automatizado y el proceso manual se obtuvo un error máximo del 12%. Lo que llevó a concluir que el desarrollo de un prototipo de automatización para efectuar la prueba de infiltración por medio del uso de anillos, hace innecesaria la presencia constante de un operador, además de disminuir los errores en las lecturas del nivel del agua en el cilindro, donde el error máximo obtenido respondió a un 11.11 %, lo cual es aceptable debido al error de precisión que posee el sensor; lo que es propio de los instrumentos de medidas digitales. Por lo que, ésta investigación permitió demostrar lo importante y beneficioso que puede resultar diseñar mecanismos de éste tipo; automatizados, en el que sean de transporte liviano al ser portátiles, totalmente recargables y además con un margen de error mínimo ante los errores que puede cometer un ser humano.

Al igual que las anteriores, Jaramillo (2013), dio a conocer una propuesta de grado para optar al título de Ingeniero en Sistemas, realizado en la Universidad Nacional de Loja, Ecuador, nombrado, *Desarrollo e implementación de un sitio web que contenga un laboratorio virtual basado en cinco modelos de infiltración hidrológica que permitan el cálculo automatizado y la toma de decisiones para obras civiles en la consultora del Ingeniero Luis Enrique Benavides.*

El portal web de la Constructora Benavides diseñado en éste trabajo, tuvo como principal objetivo ser una ventana abierta para dar a conocer a la comunidad los servicios que esta

empresa ofrece en el ámbito de la construcción civil y todos los elementos en ella representados; así como también mejorar el proceso de cálculo de datos pertinente a fenómenos hidrológicos a través de un laboratorio virtual con cinco programas paramétricos basados en modelos de infiltración hidrológica superficial que optimizan el tiempo en los procesos experimentales que realiza la constructora. Paralelamente, éste laboratorio virtual que será de acceso público, brindará a todas las personas interesadas, en especial a estudiantes y profesionales de la ingeniería civil un espacio virtual en el que se puede conocer más acerca del proceso hidrológico.

Para la consecución de este sitio web, primeramente se gestionó el proyecto con base en la metodología de desarrollo de software XP (Extreme Programming); Seguido de ello, se instaló XAMPP para emular un servidor web en la PC y continuar con el manejo del Sistema Gestor de Contenidos *Joomla*, para continuar con la implementación de la página principal del sitio web de la constructora. En cuanto al desarrollo de los programas de infiltración hidrológica se empleó el editor de código fuente Sublime Text 2, aprovechando la librería JQuery como framework de JavaScript que se estableció como el lenguaje de programación a usar, además de asociarlo al componente gráfico denominado Chartdirector para crear gráficas estadísticas. Adicionalmente, se manipuló Adobe Photoshop CS3 como herramienta para la creación, edición y retoque de imágenes. De acuerdo a lo descrito anteriormente, se buscaba que sitio web de la Constructora Benavides (www.constructorabenavides.com) se convirtiera en la nueva imagen que proyectara a esta empresa hacia la comunidad local y nacional con el propósito de alcanzar la calidad y liderazgo necesarios que permitan mejorar significativamente los servicios que se ofertan, satisfaciendo las necesidades y acrecentando la confianza de sus clientes.

Es así, como el objetivo general de todo el trabajo investigativo, estuvo encaminado en implementar un sitio web con programas de fácil uso y con interfaz gráfica amigable para servir a las personas dedicadas a la investigación hidrológica, al mismo tiempo que se desarrollan programas paramétricos en cuanto a modelos de infiltración superficial hidrológica. Lo cual debe generar un ahorro de tiempo en la ejecución de cálculos matemáticos definidos para cada modelo hidrológico, y finalmente, contribuir con la iniciativa de la consultora del Ingeniero Luis Enrique Benavides proporcionándole a estudiantes y profesionales un medio que les permita observar, experimentar y comprender el comportamiento de un sistema hidrológico y la interrelación de las variables involucradas. Tras la creación del portal web, la investigación obtuvo conclusiones favorables, ultimando que el uso de la aplicación XAMPP facilitó la realización del sitio web de la Constructora Benavides, debido a que permitió tener un servidor en el propio computador y hacer las pruebas necesarias mientras se iba implementando el sitio web. Además, el CMS Joomla utilizado para el desarrollo y administración del sitio web brindó la posibilidad de realizar un trabajo de calidad gracias a su sistema de plantillas que se adaptaron a los requerimientos de la constructora y se ajustan a los estándares definidos por la W3C. La librería JQuery utilizada por JavaScript, ayudó al desarrollo de los programas de infiltración hidrológica debido al manejo de plugins con sus propios estilos y eventos que mejoraron la interfaz gráfica de los programas. Es así, que el portal web de Constructora Benavides cuya dirección fue www.constructorabenavides.com, proporciona a la comunidad en general un servicio adicional fundamentado en un laboratorio virtual de libre acceso a estudiantes, profesionales y todo aquel visitante interesado en conocer, comprender y experimentar el comportamiento del fenómeno de infiltración hidrológica y la interrelación con las variables y parámetros involucrados.

Aunque en esta investigación no se automatizó un infiltrómetro en específico, si se sistematizó el análisis e interpretación de los datos que arroja la infiltración hidrológica, señalando cómo dos campos distintos, que son el industrial y agronómico, pueden desarrollar proyectos interdisciplinarios en los que ambos campos salgan beneficiosos con los resultados.

De igual forma, Armanda y Montúfar (2015), elaboraron un estudio sobre la determinación de la permeabilidad de los suelos basados en la metodología del infiltrómetro de mini disco en la zona de Yanahurco, Napo, en la Universidad Central Del Ecuador, específicamente en Quito. La presente investigación se enfocó en determinar la permeabilidad de los suelos en la zona de Yanahurco, provincia de Napo, empleando la metodología del infiltrómetro de mini disco. Para la identificación de los puntos de muestreo se analizó la información cartográfica generada por el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG-OMSTROM, 1982) correspondiente a pendientes, geomorfología y suelos de la zona de estudio, considerando las unidades edáficas que cumplieran con pendientes menores al 40%. Se identificaron catorce puntos de muestreo, realizándose tres repeticiones por sitio, con un total de 42 pruebas de infiltración.

Según la metodología propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se clasificó e interpretó los resultados obtenidos, determinando tres velocidades de infiltración: muy lenta (< 1.5 mm/h), lenta (1.5 a 5 mm/h) y moderadamente lenta (5 a 20 mm/h), siendo ésta última la que mayor superficie ocupó dentro del área de estudio. En base a la metodología desarrollada y una vez procesados los datos de velocidad de infiltración para los 42 puntos de infiltración estudiados en campo, se categorizó el tipo de infiltración,

obteniéndose tres categorías de las siete posibles propuestas en la metodología, y a partir de esa categorización se elaboró un mapa de permeabilidad.

Las conclusiones del estudio, indican que se logró determinar la velocidad de infiltración por el método del infiltrómetro de minidisco, de tal forma que se caracterizó la permeabilidad de los suelos presentes en la zona de estudio. Señalando que todos los suelos presentes en la zona de estudio poseen la clase textural franca, los resultados obtenidos apuntaron a que la categoría Moderadamente Lenta está presente con 3077.46 ha (48.52%), la Lenta presenta una superficie de 2166.47 ha (34.16%) y la categoría Muy Lenta tiene una superficie de 1098.30 ha (17.32 %).

La cobertura vegetal tiene una influencia crucial en la velocidad de infiltración, pues la presencia de vegetación de páramo de pajonal, determinó que los valores de velocidad de infiltración sean bajos, a pesar de que los suelos de la zona de estudio son francos, los que están asociados a velocidades medias. Al final, la metodología propuesta por el infiltrómetro de minidisco tuvo un buen desempeño en la investigación realizada, pues ahorra tiempo, recursos materiales y humanos, y los datos obtenidos fueron consistentes.

Esta investigación se trajo a colación en el marco de los antecedentes, debido a que no existen muchas investigaciones en cuanto a infiltrómetros automatizados, y mucho menos específicamente con infiltrómetros de anillo doble, por lo que resultó pertinente mostrar investigaciones en las que se han implementado diversos métodos de infiltración, con el objetivo de dar cuenta del manejo de los infiltrómetros manuales en los proyectos en los que fueron utilizados, y el impacto que se obtiene en los estudios que han automatizado éste o alguna de las partes de éste proceso de la entrada de la lámina de agua hacia el interior del suelo.

Se tiene también, la investigación efectuada por Sepúlveda (2019, quien hizo uso de un infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea. Trabajo que tuvo como objetivo adaptar el método citado a las condiciones particulares de los ámbitos de montaña mediterránea. Para ello, se siguió un método totalmente empírico en el que las experiencias de campo se convierten en la base del proceso cognoscitivo. El trabajo de campo consistió en la realización de 20 ensayos de infiltración con dos infiltrómetros de cilindro de diferente diámetro, uno de 214 mm. y otro de 300 mm, en el que la valoración de la precisión de los resultados se hizo utilizando la teoría de la estimación.

Las experiencias de campo realizadas durante la investigación, y cuyo sentido estaba sometido a concretar las características técnicas del infiltrómetro de cilindro, las cuales fueron favorables para el estudio. Se consideró que los cilindros de mayor tamaño son los más adecuados para obtener valores representativos de la realidad, así como resulta conveniente hacer uso de un cilindro de 300 mm que utilizar uno de 214 mm. Además, el autor recomienda que al momento de estimación se deba buscar un equilibrio entre efectividad y maniobra del equipo, en el que se deben instalar cilindros que sean operativos en las zonas a estudiar; por lo que se debe escoger un tamaño ideal que permita obtener resultados fiables pero a su vez admita un manejo apropiado en el campo. El conocer esta investigación, permite saber cómo es el proceso de selección de los cilindros a emplear al momento de medir la infiltración, y así garantizar que la automatización a diseñar responda a los diámetros a los que debe responder cada anillo.

Finalmente, se referencia una investigación desarrollada bajo el marco local, la cual fue elaborada por estudiantes de la Universidad de Córdoba en una materia del programa de

Ingeniería de Sistemas del presente año, en el que desarrollaron la sistematización de la toma de datos en el proceso de infiltración del agua en el suelo, Electronic Rule (De la Ossa, et. al, 2019).

El trabajo investigativo de estos autores, el cual se ubica bajo los parámetro de desarrollo tecnológico planteó la importancia de la sistematización en la toma de datos del proceso de infiltración, resaltando el valor e impacto ambiental que éste generaría al estudio y prevención de los fenómenos naturales en conjunto a la permanencia de los análisis que se le realizan al suelo y así optimizar procesos hidrológicos creando un aporte tecnológico a la ciencia motivo suficiente para el diseño y construcción de electronic rule, que garantizó no sólo una toma de datos, sino que arrojó resultados y pruebas de confiabilidad, contribuyendo así al área agrícola al dotarla de un dispositivo que obtiene resultados con menor rango de error superando las demandas de tiempo, esfuerzo y errores que se presentan con la asistencia manual.

En conclusión, de acuerdo con las anteriores investigaciones presentadas, cabe decir que cada una de ellas reconoce el esfuerzo que se ejerce dentro de los proceso de infiltración, donde diversos factores entran en juego, generando que la tarea sea aún más engorrosa; por lo que resaltan lo relevante que resultaría una automatización para éstos mecanismos agrícolas, facilitando el desarrollo de las actividades y a su vez brindar un apoyo tecnológico al campo.

Se resalta el hecho de la poca existencia de trabajos investigativos enfocados en automatizar los equipos agrícolas, lo que hace más pertinente el desarrollo del presente estudio; puesto que sólo se hallan investigaciones en las que se utilizan múltiples métodos de infiltración, pero todos se ejecutan de forma asistida, lo que no es relevante para el marco de antecedentes, pues el sentido de conocer las diferentes investigaciones con el mismo objeto de estudio es

saber la metodología y los resultados, a partir de allí, diseñar la forma como se abordará la investigación, en la que se tendrán como referencia los logros de las pesquisas anteriores.

3.2. Marco teórico

El agua que da origen a la infiltración puede provenir de fenómenos naturales como la lluvia, agua de depresiones, de cursos de aguas, etc., o de forma artificial mediante el riego agrícola. A partir de la infiltración en los terrenos, se producen tres fenómenos distintos que apuntan a la retención como humedad del suelo y posterior uso por parte de las plantas a través del fenómeno de evapotranspiración, la alimentación de los acuíferos del subsuelo y la constitución de un flujo de escurrimiento subsuperficial que puede alimentar posteriormente al flujo o escurrimiento superficial. La Infiltración es un elemento importante dentro del ciclo hidrológico, por lo que presenta diversos problemas de evaluación, planificación y diseño en la ingeniería (Radhi , 2018).

A continuación se presentan algunas teorías que apuntan hacia el objetivo de estudio de la presente investigación, y por medio de las cuales se sustenta el diseño y construcción de un infiltrómetro de anillo doble automatizado, cuyos resultados obtenidos fueron analizados a la luz de estás teoría en función de la aplicabilidad de cada uno de los elementos que comprendieron este estudio investigativo.

3.2.1. Infiltración

En términos teóricos, según Campos-Aranda (1992) la infiltración es el proceso por el cual el agua que llega a la superficie del suelo pasa hacia su interior. Dicho proceso es muy sensible a cambios en el manejo del suelo (Davidoff y Selim, 1986); debido a que, durante un ensayo la tasa de infiltración instantánea decrece en el tiempo hasta un valor constante

llamado infiltración básica, controlado por la conductividad hidráulica saturada o K_s ; entendida como una medida del flujo que atraviesa una sección del sistema poroso del suelo saturado (Amoozegar, 1992).

En este sentido, responde al recorrido que ejerce el agua desde la superficie del terreno hasta llegar al suelo, a través de un ingreso vertical del agua, en el que ésta penetra los macro y microporos del suelo por lo que, dentro del ciclo hidrológico es de gran importancia en la relación entre la precipitación y el escurrimiento, puesto que en una primera etapa es capaz de satisfacer la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posterior a ello, después de superar cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos.

Además, el fenómeno de infiltración refleja cómo el agua transita desde la superficie hasta el interior del suelo, éste último depende de las propiedades que posee el terreno, su conductividad hidráulica; que al mismo tiempo es controlado por el contenido y tipo de suelo, la dureza de las raíces de la vegetación, la preparación del suelo, las características químicas del agua empleada y las variaciones de temperatura que se crean por el mismo proceso de infiltración, registrando así la capacidad de almacenamiento que tiene el suelo. (Rodrigues Pinheiro, Van Lier, Inforsato, & Simunek, 2019).

Cabe resaltar, que durante éste proceso se distinguen tres fases, en primer lugar la fase de Intercambio; la cual se caracteriza por presentarse en la parte superior del suelo, el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o mediante la transpiración de las plantas. En segundo lugar está la fase de Transmisión, que ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable; y la tercera fase es conocida

como Circulación, esta sucede cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

3.2.2. Capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración se entiende como la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones, éste valor varía en función de la humedad, el material que lo conforma, y la mayor o menor compactación que tiene el mismo. Es de gran importancia distinguir entre "tasa de infiltración"; que se refiere al flujo de fluido que penetra por unidad de tiempo, y capacidad de infiltración del suelo, que representa la tasa de infiltración que podría darse si no existiera limitación de aporte de agua superficial. De tal manera, que si el aporte es mayor que la capacidad, la tasa de infiltración sería igual a la capacidad y se produciría una acumulación en la superficie que daría lugar a la escorrentía superficial.

La capacidad de infiltración se define como el nivel máximo de agua que un suelo puede absorber dependiendo de sus propiedades físicas y del estado de humedad antecedente a la precipitación. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hora. Heras (1970), sostiene que en la década de los años treinta, los trabajos de Horton en infiltración dominan el pensamiento hidrológico, ya que conociendo la precipitación y la capacidad de infiltración de un suelo en un momento dado se puede determinar la escorrentía superficial.

Es así, como la capacidad de infiltración se puede obtener haciendo el cociente entre cantidad de agua infiltrada y el intervalo de tiempo, siendo la ecuación: $f = \text{Variación altura} / \text{Variación de tiempo}$.

3.2.3. Ensayo de infiltración

Los ensayos de infiltración permiten conocer la variación de la capacidad de infiltración en función del tiempo. Los ensayos más simples y difundidos son los que se desarrollan con los anillos concéntricos; en el que los datos obtenidos de la práctica de campo se registran en una planilla midiendo las distintas alturas de agua y los tiempos correspondientes. Los intervalos de tiempo dependen del suelo donde se hace la medición, y con los datos de altura y tiempo se obtienen los deltas de ambos.

Para los ensayos de infiltración, no se deben obviar ciertos parámetros como:

1. Velocidad de infiltración (I): Es la relación entre la lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo; expresándose generalmente en mm/h ó $cm/hora$.
2. Lámina acumulada (I_{ac}): Es el volumen de agua infiltrado, expresado linealmente como una altura o profundidad de agua, en mm .
3. Infiltración básica (I_b): Es la velocidad de infiltración cuya variación respecto al tiempo es muy lenta, tendiendo a constante e incluso constante.
4. Infiltración promedio (I_p): Es el promedio de las velocidades de infiltración en un período de tiempo.

3.2.4. Factores que afectan el proceso de infiltración

Debido a que la infiltración responde al trayecto que ejecuta el agua para pasar de la superficie hasta el interior del terreno, resulta pertinente conocer los distintos factores que ponen en riesgo la actividad de infiltración, de los cuales se tienen en cuenta las características del fluido y del origen del agua, puesto que el agua contiene cierta cantidad

de sedimentos finos, arcillas, coloides, etc.; los cuales causan un efecto desacertado cuando están en suspensión en el fluido, puesto que obstruyen los poros del suelo disminuyendo la infiltración a través de la superficie. El fluido que se infiltra a menudo contiene sales, estas sales pueden afectar la viscosidad del líquido o formar complejos con los coloides del suelo que afectan la estructura del mismo. De igual manera, la temperatura afecta la viscosidad del fluido con su consiguiente influencia en la velocidad de circulación del agua a través de los poros del suelo. Y en cuanto a las precipitaciones, cuanto mayor es su intensidad, más rápidamente se produce la saturación del suelo, incrementándose los excesos superficiales; al mismo tiempo, el impacto de las gotas de lluvia también afecta la infiltración, al destruir la estructura superficial del suelo.

Hiller (1971), también habla acerca de los factores que afecta la infiltración, determinando cada uno de ellos, en el que resalta la textura; definiendo número y tamaño de poros y la superficie específica de las partículas, seguido de la estructura del suelo, que alude al tipo y distribución de la macro y microporosidad. De la misma manera, postula que la materia orgánica del terreno, incide directa e indirectamente en la estructura, porosidad y grado de humedecimiento, en el que la humedad del suelo, indica la dinámica hídrica que condiciona la velocidad del proceso de infiltración, debido a la interacción de dos factores, que son el almacenaje y conductividad hidráulica.

Sustenta que la salinidad favorece la infiltración, mientras que el exceso de sodio y magnesio la disminuye, debido a fenómenos de dispersión de las arcillas por defloculación coloidal; así como también plantea que las diferentes situaciones de manejo que provocan alteraciones en el suelo (arado, compactado, surqueado, sembrado, regado, agrietado, etc.) hacen variar significativamente los ritmos de infiltración.

3.2.5. Infiltrómetro

El infiltrómetro es una herramienta utilizada en el campo para la determinación de la conductividad hidráulica del suelo, normalmente utilizado para la caracterización de suelos y el manejo de recursos hídricos, Se entiende como un aparato empleado para llevar a cabo el proceso de infiltración en el suelo, sus medidas responden a uno o dos tubos de chapa de diámetro fijo, que se clava en el suelo a una profundidad variable, y se le agrega una cierta cantidad de agua para posteriormente observar el tiempo que tarda ésta en infiltrarse (Pikul, Zuzel, & Wilkins, 1992).

3.2.6. Infiltrómetro de doble anillo

Se utiliza para caracterizar la infiltración de una lámina de agua localizada sobre la superficie del suelo. Es el método de campo más generalizado, que permite medir la disminución de la altura de agua almacenada en un recipiente cilíndrico, clavado en la superficie del suelo, durante intervalos de tiempo. El infiltrómetro de anillos concéntricos estandarizado tiene las siguientes dimensiones y componentes: aro interior, 220 a 300 mm de diámetro y 300 mm de altura, que se entierra de 100 a 150 mm; el aro exterior de por lo menos 500 mm de diámetro y 300 mm de altura. Ésta herramienta también está compuesta por una regla milimetrada fija y una varilla corrediza con un gancho con cuya punta se toca el nivel del agua, desde abajo. La profundidad del agua dentro del cilindro interno debe mantenerse entre los 70 y 120 mm, por lo que la reposición hasta recuperar el nivel original debe hacerse cada 30 a 60 mm de descenso de la superficie libre del agua. Existen muchas variantes referentes a las dimensiones y materiales del instrumental y a las formas de entregar el agua y medir el descenso del nivel como se observa en la figura 1.



Figura 1. Infiltrómetro de anillo doble (A) - Infiltrómetro de anillo doble -HM-4502 (B).

Tomado de: www.directindustry.es y www.cotecno.cl

Se utiliza para determinar el índice de infiltración del agua en el terreno y, de este modo, la capacidad para la irrigación, el drenaje, y así escoger la intensidad de las precipitaciones artificiales y el efecto de diferentes tratamientos para el suelo.

Las ventajas del Infiltrómetro de doble anillo, es que es el indicado para la medición de la infiltración de suelos superficiales, permite obtener información de inundación/surco, consta de anillos dobles para obtener una media representativa, los cuales son de acero inoxidable asegurando una durabilidad.

Los anillos se insertan en el suelo a una profundidad mínima necesaria para evitar las fugas de los mismos. La medición es menor que la obtenida con un infiltrómetro de un solo anillo, y más concordante con la capacidad real del suelo. Para el estudio del suelo, se hallan diversos métodos, entre los cuales está el método de Muntz, que trabaja con los mismos anillos pero cambia la forma de medir, en cuanto a que junto al cilindro interior se entierra una punta,

colocándose una determinada cantidad de agua por encima y repitiendo la medición en intervalos de tiempo y descenso del agua.

Los principales inconvenientes, aparte del carácter local de la experiencia, son que el suelo se modifica al clavar el tubo, y no hay efectos de compactación, ni de arrastre de finos, ni del aire. Se aclara que el terreno no es preparado para el ensayo de infiltración, sino que se hace sobre el terreno natural.

Como la medición varía según el estado de humedad inicial existente al momento del ensayo, deben realizarse una serie de pruebas para distintos grados de humedad. Para ello se pueden emplear métodos indirectos, por medio de los cuales se determina la capacidad de infiltración considerando una cuenca perfectamente controlada, con datos precisos de precipitación, evaporación y escorrentía, para así determinar la infiltración; aunque, sería menos exhaustivo si se automatizan éstas herramientas de infiltración. (Abdelbaki, 2016).

La metodología para las practicas con infiltrómetros de anillo doble tradicionales, está establecida bajo la normal ASTM D 3385-03, esta norma fue aprobada en el año 1975, estableciendo tanto medidas estándar para los infiltrómetros (500 mm de altura y unos diámetros de anillos de 600 y 300 mm para los anillos), como para la recolección de datos.

Para la mayoría de tipos de suelo, después de llenar el volumen de líquido, se deben realizar mediciones cada 15 minutos durante la primera hora, cada 30 minutos durante la segunda hora, y cada 60 minutos hasta llegar a la sexta hora. (Materials., 1978). En el análisis de los datos se debe convertir el volumen de líquido utilizado durante cada intervalo de tiempo registrado en una velocidad de infiltración, para ambos anillos tanto el interno como en el espacio anular, para esto se utiliza la ecuación:

1. Cálculos del anillo interior:

$$V_{IR} = \Delta V_{IR} / (A_{IR} \cdot \Delta t) \quad (1)$$

Dónde:

V_{IR} = Incremento en la velocidad de infiltración del anillo interno, cm/h

ΔV_{IR} = Volumen de líquido utilizado durante el intervalo de tiempo para mantener la altura constante en el anillo interior cm^3 .

A_{IR} = Área interna del anillo interno cm^2

Δt = Intervalos de tiempo h .

2. Cálculos para el espacio anular, este es el espacio que existe entre los dos anillos:

$$V_A = \Delta V_A / (A_A \cdot \Delta t) \quad (2)$$

Dónde:

V_A = Incremento en la velocidad de infiltración del espacio anular, cm/h

ΔV_A = Volumen de líquido utilizado durante el intervalo de tiempo para mantener la altura constante en el espacio anular entre los anillos cm^3 .

A_A = Área del espacio anular entre los anillos cm^2 .

Δt = Intervalos de tiempo h .

Para la construcción del reporte de los datos obtenidos ya sea mediante un informe o únicamente los registros de campo, se debe anotar la localización del sitio de ensayo, las fechas de inicio y final del ensayo, las condiciones climáticas de inicio a fin, los nombres de los operarios, una descripción del tipo de ensayo, el tipo de líquido utilizado en el ensayo

incluido el pH y si está disponible, un análisis completo del líquido. Seguidamente, debe reportarse el área de los anillos y el espacio anular entre estos, la constante de volumen para su graduación, la profundidad del líquido en el anillo interno y el espacio anular, registro de temperatura del suelo y del líquido, medición de los volúmenes y velocidades de infiltración para el anillo interno y el espacio anular versus el tiempo del ensayo, así como determinar si las velocidades de infiltración entre el anillo interior y el espacio anular difieren, tomando como valor la del anillo interno (la diferencia se debe a un flujo divergente), si es posible describir la profundidad del nivel freático junto con una descripción de los suelos encontrados entre los anillos, y finalmente, un gráfico de la tasa de infiltración contra el tiempo transcurrido.

El primer paso para el ensayo es la delimitación del área, enterrando el anillo exterior, para esto se utilizan martillos de goma y alguna base que distribuya el impacto para lograr enterrarlo de forma homogénea, luego de realizar el mismo proceso con el segundo anillo, se procede a llenar estos con una columna de agua, la cual se mide a medida que disminuye, éstas medidas se realizan con un intervalo de entre uno a cinco minutos, durante un tiempo aproximado de cuatro horas (Group, 2011).

Teniendo en cuenta el tiempo total del ensayo, y que el operario se ve obligado a mantener la posición de toma de medidas durante tanto tiempo, puesto que la variación en el ángulo de visión contribuye a la toma de datos erróneos, esta es una forma ineficiente para realizar el estudio, lo que hace indispensable el desarrollo de un dispositivo automatizado que facilite ésta labor.

3.2.7. Obtención de datos en el proceso de infiltración

Horton (1940), dio a conocer una postura clásica de la infiltración, ofreciendo un modelo que se sostiene en que la capacidad de infiltración varía desde una magnitud elevada, al principio de la precipitación, hasta un valor más bajo, que se convierte en constante después de un período de lluvia largo.

El anterior autor, presentó una serie de parámetros por los que se puede definir el proceso de infiltración en un suelo, y los que se deben tener en cuenta al momento de recopilar los datos, los cuales apuntan a:

1. Capacidad de Infiltración inicial (f_0): Se entiende como la tasa de infiltración que se obtiene al inicio del proceso de medición, donde un valor de ésta tasa depende de la humedad inicial (Horton, 1940).
2. Capacidad de Infiltración o Tasa de Infiltración Final Estable – Velocidad de Infiltración o Final (f_c): Ésta se define como la tasa constante de infiltración o velocidad de infiltración, caracterizada por un régimen relativamente estabilizado, el cual se obtiene cuando el agua ha infiltrado la totalidad del suelo. Éste valor no mantiene una constancia por depender del valor inicial de la capacidad de infiltración (f_0) (Horton, 1940).
3. Infiltración Acumulada: Corresponde a la cantidad de agua que se ha infiltrado en un suelo durante un determinado periodo de tiempo (Horton, 1940).
4. Tasa o velocidad de Infiltración Media: Alude a la cantidad de agua acumulada que se filtra por una unidad de superficie a lo largo del tiempo al que se somete el proceso (Horton, 1940).

5. Índice de Decaimiento de la Tasa de Infiltración: Es vista como la diferencia entre la tasa de infiltración inicial y la tasa de infiltración final estable, dividido por el tiempo transcurrido entre ambos puntos.

3.2.8. Infiltración y flujo de agua subterránea

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie hasta el suelo y se la denomina subsuperficial. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie, la cubierta vegetal, las propiedades físicas de los medios tales como porosidad, conductividad hidráulica, contenido de humedad.

Existen tres hechos que pueden pasar con el agua, primero, que puede ser devuelta a la superficie por fuerzas capilares y evaporada hacia la atmosfera, ahorrándose así gran parte de su recorrido dentro del ciclo hidrológico descrito anteriormente; segundo, ésta puede ser absorbida por la raíces de las plantas que crecen en el suelo, ingresando de nuevo en la atmosfera a través del proceso de transpiración, y tercero, que la que se ha infiltrado profundamente en el suelo, puede ser obligada a descender por la acción de la gravedad hasta que alcance el nivel de saturación, constituyendo un depósito de agua subterránea. Para comprender la manifestación del agua subterránea se debe conocer la distribución vertical del agua dentro de las formaciones, definiéndose así dos zonas, la parcialmente saturada “Aireación” o de presiones intersticiales negativas y la zona de saturación, con presiones intersticiales positivas.

El origen de las presiones intersticiales radica en la presencia de agua en los poros o intersticios del suelo conocida también como presión de agua de poros, vista como la

resistencia ejercida por la fase intersticial del suelo al aplicarse una carga en superficie (William Lambe, 1995).

La zona de aireación en la que las aberturas se encuentran parcialmente llenas de agua no tiene límites definidos, debido a que, el espesor de la franja intermedia varía mucho, teniendo un efecto significativo en el tiempo que le toma al agua pasar para recargar la zona de saturación. El espesor de la franja capilar depende directamente de tamaño de los granos del material. (Johnson, 1975). De ésta forma, se pueden identificar dos tipos de flujo del agua en medios porosos, que son los que se dan en suelos totalmente saturados y los parcialmente saturados definidos por la Ley de Darcy, que resulta fundamental para evaluar el movimiento de agua en el suelo.

3.2.9. Conductividad hidráulica

La Conductividad Hidráulica es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga. Para evitar confusiones entre la Permeabilidad Intrínseca y la Conductividad Hidráulica, la primera se define como la capacidad de un medio de transmitir un fluido y esta propiedad esta únicamente en función del medio por lo que es independiente de las propiedades del fluido (Donado L., C. J., 2004) . La Conductividad Hidráulica, incluye las propiedades del fluido (agua subterránea), para trabajos prácticos en Hidrogeología, donde el agua es el fluido predominante, la Conductividad Hidráulica es la propiedad ocupada. Por lo tanto, se puede decir que un medio tiene una unidad de conductividad hidráulica si este puede transmitir en una unidad de tiempo, una unidad de volumen de agua subterránea a una viscosidad predominante a través de una sección transversal unitaria, medida en ángulo recto a la dirección del flujo, bajo una unidad de gradiente hidráulica (Martínez, G., 2012).

La conductividad hidráulica expresa la aptitud de un medio poroso como el suelo para transmitir agua; en el que se distinguen dos tipos de transmisiones de agua en el suelo, la que se ejecuta en régimen no saturado y en régimen saturado. En éste último, la conductividad hidráulica (K_S), se caracteriza porque el espacio poroso se encuentra lleno de agua, y en cuanto a la conductividad hidráulica en terreno no saturado (K), se identifica que el volumen de poros del suelo se mantiene parcialmente lleno de agua, siendo el flujo que se presenta en suelos que se humectan o se secan de forma rápida (Porta, 1999). Siendo entonces el estado más frecuente en los procesos de infiltración que se ejecutan, cuyo mayor inconveniente es que resulta difícil describir y medir el flujo cuando éste es saturado, puesto que no es posible controlar los múltiples factores que son constantes en el espacio saturado. Estos estudios del flujo de agua en medios porosos han dado origen a leyes, donde la que describe el flujo de agua en condiciones saturadas es la Ley de Darcy; mientras que, la del flujo no saturado se rige por la Ley de Buckingham y Darcy.

Por este motivo, los estudios de infiltración son de gran interés para las valoraciones medioambientales, porque los cálculos de infiltración permiten valorar la degradación de los suelos por erosión hídrica, así como determinar el caudal de aguas residuales que es capaz de infiltrar un suelo; y al mismo tiempo, mejorar los suelos afectados por salinidad mientras se estudia el ciclo hidrológico.

3.2.10. La ley de Darcy y el movimiento del agua en el suelo

La ley física que describe el movimiento del agua a través del suelo fue propuesta por Darcy en 1856. Darcy encontró que la velocidad del agua que fluye en un medio poroso es directamente proporcional al gradiente hidráulico causado por el flujo. Por lo que diseñó una ecuación de flujo de agua subterránea derivada de la aplicación de las leyes de la mecánica

de medios continuos para flujo de agua subterránea a través del volumen elemental representativo. La primera ley aplicada es la ecuación de continuidad (conservación de la masa), que establece que la convergencia de flujo es igual al cambio en el almacenamiento de las aguas subterráneas en el medio poroso. La segunda ley de Newton del movimiento que expresa el equilibrio de todas las fuerzas que actúa sobre el fluido en movimiento (conservación del momento).

Entonces, la ley de Darcy queda expresada de la siguiente manera, donde, se maneja la descarga específica, la diferencia de presiones, donde las dos anteriores expresiones corresponden al mayor gradiente en la dirección de x y K , que es la constante de proporcionalidad, lo que alude a la conductividad hidráulica, expresada como la capacidad de transmitir el flujo en el medio (Smedt, 2008). En términos de velocidad sabemos que en cualquier conducto la velocidad viene definida por su geometría y su caudal, entonces si aplicamos esta consideración en el planteamiento de esta ley “Permeámetro de Darcy” obtendremos una velocidad falsa “Velocidad lineal” que circula por toda la sección del medio poroso, y para llevarla a términos de velocidad real “Velocidad de Darcy”, incluimos otro factor que es la tortuosidad del medio poroso, obteniendo una ecuación donde, el coeficiente está dado en función del parámetro tortuosidad que se lo define como una longitud real del recorrido del agua dentro del medio, que resulta ser mayor, debido a la porosidad del medio (Roman, 2009).

No obstante, La Ley de Darcy puede no cumplirse por algunas razones, las cuales apuntan a que la constante de proporcionalidad (K) no es propia y característica del medio poroso, sino que también depende del fluido. Las aguas subterráneas presentan mínimas diferencias de temperatura a lo largo del año en un mismo acuífero, pero en otros entornos sí pueden

producirse diferencias de temperatura notables. (J. Tindall, 1999) Por tanto, aunque sabemos que K depende tanto del medio como del propio fluido, como la parte que depende del fluido normalmente es despreciable, para las aguas subterráneas a efectos prácticos asumimos que la K de Darcy, o conductividad hidráulica es una característica del medio poroso. En algunas circunstancias, la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico no es lineal, esto puede suceder cuando el valor de K es muy bajo o cuando las velocidades del flujo son muy altas.

3.2.11. Prueba chi-cuadrado

La prueba chi-cuadrado (X^2) se le acuña a Pearson, y es una de las técnicas estadísticas más usadas en la evaluación de datos de conteo o frecuencias, principalmente para los análisis de tablas de contingencia ($r \times c$) donde se resumen datos categóricos.

Esta prueba puede utilizarse incluso con datos medibles en una escala nominal. La hipótesis nula de la prueba Chi-cuadrado postula una distribución de probabilidad totalmente especificada como el modelo matemático de la población que ha generado la muestra. Para realizar este contraste se disponen los datos en una tabla de frecuencias. En el que cada valor o intervalo de valores indica la frecuencia absoluta observada o empírica (O_i). En esta medida, la prueba investiga la diferencia en valores de frecuencias cuando se clasifica una muestra “n” por un atributo “A” y después se realiza una nueva clasificación de “A” por un segundo atributo “B” (Mendivelso, y Rodríguez, 2018).

Esta prueba estadística maneja ciertos indicadores que permiten interpretar los resultados obtenidos, en el que O_i , se interpreta como el valor observado y E_i , es el valor esperado. Sin embargo, para que se pueda tener resultados favorables, la muestra debe ser lo suficientemente grande.

Debido a que ésta prueba permite contrastar valores esperados con los obtenidos, se decidió utilizar ésta estadística al momento de analizar los resultados que arrojó el Infiltrómetro automatizado, y comparar los datos obtenidos de éste con los que arroja un infiltrómetro de doble anillo normal; y así determinar la funcionalidad y aplicabilidad de la automatización.

3.2.12. Arduino Uno

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa que contiene un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

Por otro lado, Arduino proporciona un software consistente en un entorno de desarrollo (IDE) que implementa el lenguaje de programación de Arduino y el bootloader ejecutado en la placa, en el que su principal es la simplicidad y facilidad de uso. Permitiéndole ser utilizado para el desarrollo de elementos autónomos, que sean conectados a dispositivos y que garantice una interacción tanto con el hardware como con el software.

Así mismo, Arduino Uno, es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328., que cuenta con catorce entradas y salidas digitales, de las cuales seis se pueden utilizar como salidas PWM (Modulación por ancho de pulsos) y otras seis son entradas analógicas. Además, incluye un resonador cerámico de 16 MHz, un conector USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reseteo. La placa incluye todo lo necesario para que el microcontrolador haga su trabajo, por lo que sólo necesita ser conectada a un ordenador con un cable USB o a una corriente eléctrica a través de un transformador.

Lo que resulta beneficioso, al momento de diseñar un infiltrómetro de anillo doble automatizado, puesto que mediante ésta herramienta electrónica en conjunto con demás elementos tecnológicos, se podrá controlar todos los procesos manuales que el operario debe ejecutar para llevar a cabo el proceso de infiltración del agua, y medir en tiempo lo que tarda ésta en traspasar la superficie (Arduino, 2019).

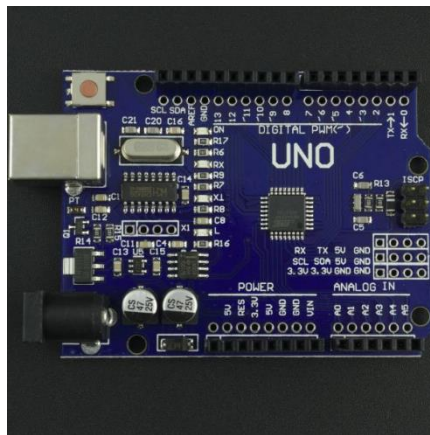


Figura 2: Arduino UNO R3 Con CH340. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016)

3.2.13. Electroválvula

También conocida como válvula electromagnética, se utiliza cuando la señal proviene de un temporizador eléctrico, un final de carrera eléctrico, o mandos electrónicos.

En general, se elige el accionamiento eléctrico para mandos con distancias extremadamente largas y con corto tiempo de conexión. Las electroválvulas, se dividen en válvulas de mando directo o indirecto; las de mando directo se utilizan únicamente para un diámetro de luz pequeño, puesto que para diámetros mayores los electroimanes necesarios resultarían demasiado grandes. Para reducir al mínimo el tamaño de los electroimanes, se utilizan válvulas de mando indirecto, que se componen de dos válvulas; una válvula electromagnética de servopilotaje (312, de diámetro nominal pequeño) y una válvula principal, de mando

neumático.

Una electroválvula está compuesta por dos partes, en primer lugar por una cabeza magnética constituida principalmente por una bobina, tubo, culata, anillo de desfasado, y resorte(s), y en segundo lugar; por un cuerpo, con orificios de racordaje, obturados por clapet, membrana, pistón, etc. según el tipo de tecnología empleada. La apertura y el cierre de la electroválvula están unidos a la posición del núcleo móvil que se desplaza bajo el efecto del campo magnético provocado por la tensión de la bobina.

En teoría, una electroválvula, es una válvula electromecánica, diseñada para controlar el paso de un fluido por un conducto o tubería, la cual se mueve mediante una bobina, y se caracteriza por tener dos posiciones, que son *abierta* y *cerrada*, razón por la que se implementó para controlar el agua que se utilizaría al momento de medir el nivel de infiltración que tiene el agua en un suelo, y así arrojar el agua necesaria, sin correr el riesgo de desperdiciar el líquido, así como también se garantiza que no habrá daños en la estructura del suelo por exceso de agua (Grupo Festo, 2019).

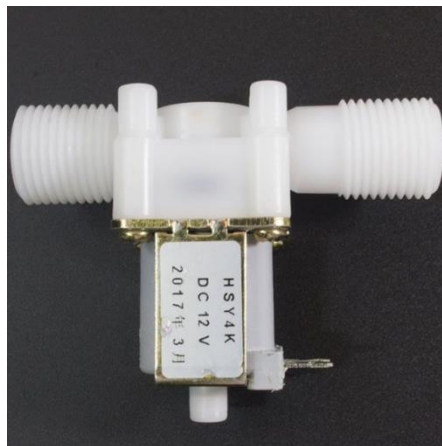


Figura 3 Electroválvula 12V. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016)

3.2.14. Módulo microSD

El módulo microSD (Secure Digital), es una tarjeta de interfaz diseñada para acceder a la memoria microSD en modo SPI (Protocolo de Comunicación Serial), por lo que las señales de control se etiquetan claramente con los nombres de las señales en dicho bus de comunicaciones. Posee un regulador de tensión incluido para alimentar con 5 y 3.3 V., y su interfaz de comunicación SPI permite que sea utilizado con Arduino o PIC (Circuito Integrado Programable).

Este módulo de tarjeta microSD permite llevar a cabo aplicaciones de manera mucho más dinámica y de una forma sencilla. Se conecta fácilmente como un periférico a la board Arduino por medio de códigos de programación y se puede leer y escribir en la tarjeta microSD usando el Arduino o en la Raspberry Pi. También puede ser usado para sistemas de control ARM (Ordenador con conjunto reducido de instrucciones) /MCU (Unidad de control multipunto). Es aplicado en prácticas de robótica, modelismo, Arduino o cualquier proyecto de electrónica, permite el almacenamiento extra a sus aplicaciones, y tiene todas las conexiones necesarias para su correcto funcionamiento (KEA DESIGN S.R.L., 2019).



Figura 4 Lector de tarjetas microSD. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016)

3.2.15. Relevador o Relé

El relevador, también conocido como *Relay* o *Relé*, es un interruptor cuyo control corre por cuenta de un circuito eléctrico, se desarrolló en la primera mitad del siglo XIX por el físico norteamericano Joseph Henry, a través de una bobina y un electroimán que incide sobre diversos contactos para la apertura o el cierre de otros circuitos, que funcionan de manera independiente.

De esta forma, el relevador actúa como un interruptor que puede fomentar el paso de la corriente eléctrica o su interrupción, permitiendo desarrollar una conmutación a distancia, controlando altas tensiones con un bajo voltaje en retorno. También sirve para interrumpir la alimentación de corriente alterna.

En palabras más sencillas, el relevador permite controlar una gran cantidad de electricidad operando con una cantidad muy pequeña. Se trata de un instrumento que brinda una mayor seguridad en distintos dispositivos que funcionan con el uso de energía eléctrica, ya que sus contactos permiten abrir o cerrar circuitos eléctricos (es decir, generar o interrumpir la conexión) (Academic, 2019).



Figura 5. Relé SRA-12VDC-CL de 20^a. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016)

3.2.16. Ultrasonido

El ultrasonido es el estudio y aplicación de las ondas acústicas de alta frecuencia, usualmente, más allá de los 20 *KHz*. Los generadores modernos de ultrasonidos pueden producir frecuencias tan altas como algunas gigas Hertz (*GHz*) mediante la transformación de corrientes alternas en oscilaciones mecánicas. Las altas frecuencias tienen longitudes de onda cortas, lo cual les permite reflejarse desde cualquier objeto más rápidamente para proporcionar una mejor información sobre esos objetos. Sin embargo, las altas frecuencias son difíciles de generar y de medir.

La detección y medida de las ondas ultrasónicas se lleva a cabo principalmente mediante el uso de receptores piezoeléctricos o por medios ópticos. Esto es posible, porque las ondas ultrasónicas se vuelven visibles por la difracción de la luz. El ultrasonido está muy por encima del rango auditivo del ser humano, el cual se encuentra alrededor de 20 a 20.000 Hz. Las raíces de la tecnología ultrasónica tienen su génesis en el efecto piezoeléctrico conducido por Pierre Curie alrededor del año 1880. El encontró que cristales asimétricos como el cuarzo y la sal de Rochelle generaban una carga eléctrica cuando se les sometía a una presión mecánica, alternativamente, también era posible obtener vibraciones mecánicas aplicando una carga eléctrica a los mismos cristales. Una de las primeras aplicaciones del ultrasonido fue el *sonar* (que no es más que el acrónimo de Sound Navigation Ranging). Este fue empleado a gran escala por la armada de los estados unidos durante la segunda guerra mundial para detectar los submarinos enemigos (Bozo, y otros, 2008)

Las ondas ultrasónicas pueden ser generadas usando fuentes de energías mecánicas, electromagnéticas y térmicas, éstas pueden ser producidas en vidrio, líquidos y sólidos.

Ahora bien, el método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para el ensayo de los materiales, es una técnica de ensayo no destructivo (END) y tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras, al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza. Las ondas pueden ser sónicas comprendidas en el intervalo de frecuencias entre 20 y 500 *KHz* y las ultrasónicas constan de una frecuencia superior a 500 *KHz*. En el método ultrasónico se utilizan instrumentos que transmiten ondas con ciertos intervalos de frecuencia y se aplican para detectar defectos como poros, fisuras, también para conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos como la composición y estructura. Lo que resulta necesario al momento de automatizar el infiltrómetro, puesto que el ultrasonido podrán controlar, medir y conocer los niveles de agua que se infiltran desde la superficie hasta el interior del suelo y a su vez conocer la conductividad hidráulica de ésta y determinar las características en materia de componentes que integran el suelo a estudiar (Electronicasi, 2012).



Figura 6 Sensor de Ultrasonido HC-SR04 Arduino. Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016)

3.3. Marco Conceptual

Dado que el marco conceptual se encarga de caracterizar y definir los elementos conceptuales que se emplean en un determinado proceso investigativo, es imperioso desarrollar una recopilación de las nociones más relevantes que enmarcan este trabajo, y cuyo significado es indispensable para una mayor comprensión de los resultados y conclusiones alcanzadas. De acuerdo con lo anterior, es preciso recurrir a las siguientes concepciones.

3.3.1. Conductividad

Se refiere generalmente a una propiedad eléctrica, pero también se describe como la transferencia térmica o acústica. Es la capacidad de un material en particular para ser un medio de transferencia, es decir, que posee la facultad de conducir ya sea electricidad, calor u otro elemento.

3.3.2. Hidráulica

Gracias a la llegada de Blaise Pascal (s. XVII), se asentaron las bases de la teoría de los fluidos, base de la energía hidráulica. La hidráulica es una rama de la física y la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos. En ingeniería, se usan dispositivos que funcionan con líquidos, generalmente agua o aceite, como por ejemplo los molinos de agua, acueductos, turbinas, etc. Es entonces, la encargada de estudiar el equilibrio y el movimiento de los fluidos, utilizada como técnica para conducir, contener, elevar y aprovechar las aguas.

3.3.3. Sistematización

Hace referencia a la utilización de sistemas de información, tecnologías, y apoyos informáticos que permitan una eficiente y controlada ejecución de las labores. Su principal objetivo es

brindarle al usuario herramientas que ayuden en la realización de las labores, a partir de la automatización de éstas. Éste término hace alusión a una amplia variedad de sistemas y procesos que operan con mínima, incluso sin intervención del ser humano; debido a que, incluye herramientas tecnológicas que apoyan las actividades que requieren de un operario.

3.3.4. Suelo

El suelo es la porción más superficial de la corteza terrestre, constituida en su mayoría por residuos de roca provenientes de procesos erosivos y otras alteraciones físicas y químicas, así como de materia orgánica fruto de la actividad biológica que se desarrolla en la superficie. Se trata de una superficie sumamente variada y multiforme, sobre la cual se producen los fenómenos climáticos como la lluvia, el viento, etc.

Los suelos se forman por la destrucción de la roca y la acumulación de materiales distintos a lo largo de los siglos, en un proceso que involucra numerosas variantes físicas, químicas y biológicas, en la figura 7 se aprecian 3 tipos de suelo diferentes.

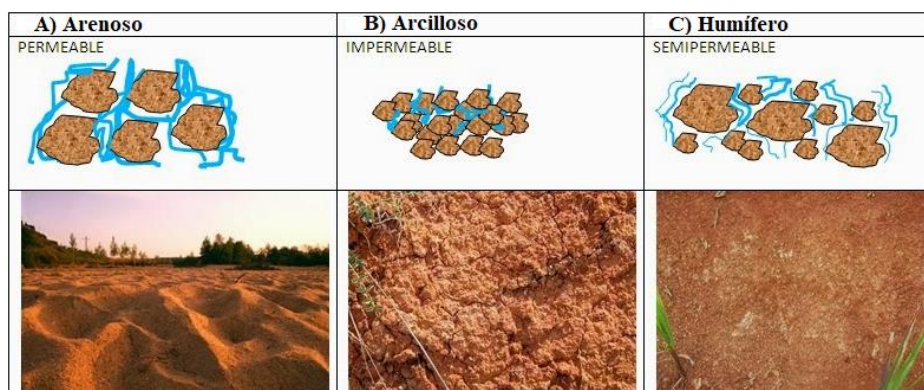


Figura 7. Suelo arenoso (A) - Suelo arcilloso (B) - Suelo humífero (C). Tomado de <http://tomasbmultimediasbp.blogspot.com>.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Fase de documentación

A continuación, tras una búsqueda bibliográfica sobre diseños de infiltrómetros automáticos con anillo doble, se presenta de forma detallada los requerimientos y funciones a los que debía responder el infiltrómetro, en cuanto a construcción y funcionamiento del mismo, con base en la documentación realizada. En este sentido los registros encontrados respondieron a conocer el diseño de un infiltrómetro de doble anillo, y la forma como el agua se distribuye en él, tal y como se observa en la figura 8.

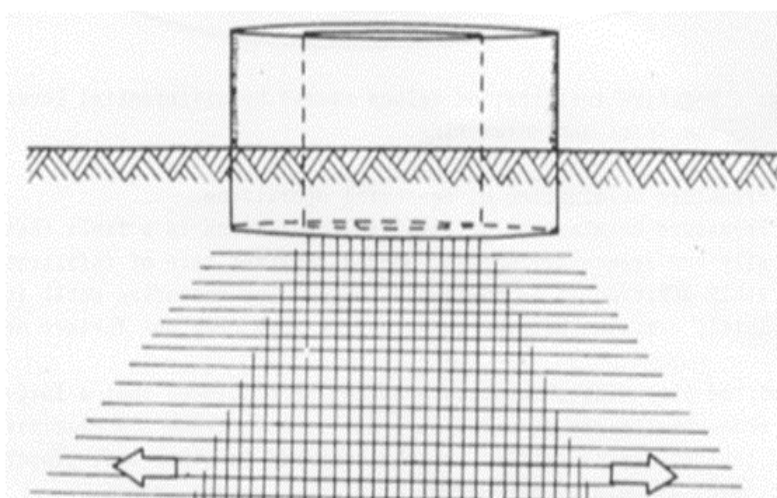


Figura 8. Distribución del agua en un infiltrómetro de anillo doble. Recuperado de <http://www.prosap.gov.ar>

Del mismo modo, la figura 9. Representa los tipos e infiltrómetros que se hallan en el mercado, los cuales responden a diseños totalmente distintos.

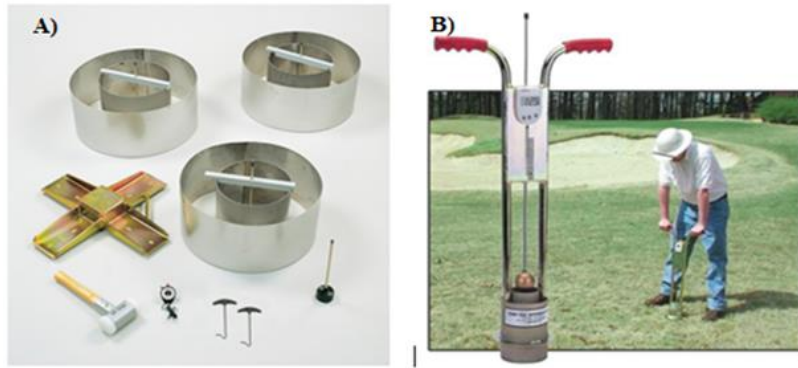


Figura 9. Infiltrómetro de doble anillo (A) - Infiltrómetro Truf-Tec (B). Tomado de: <https://sp.eijkelkamp.com> y <https://www.turf-tec.com>

Además, dentro de la documentación realizada se hallaron figuras que ilustran cómo queda el equipo de campo al unirse junto con el dispositivo automatizado, lo que se convirtió en uno de los modelos a seguir para la finalización de la construcción de éste infiltrómetro de anillo doble automatizado. La figura 10 representa el esquema final que se deseó en este estudio:

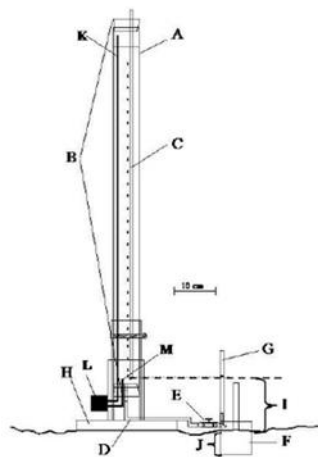


Figura 10. Esquema del infiltrómetro con el dispositivo de automatización armado y montado en campo. Tomado de Chávez, G. (2009). Recuperado de <https://www.researchgate.net>

A partir de estos diseños, se realizó el infiltrómetro, el cual respondió a una serie de especificaciones, encontradas en la siguiente fase.

4.2. Determinar parámetros de diseño

4.2.1. Proceso

Para la selección de los criterios de diseño se asistió a la práctica de campo de los estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica, en esta se registraron aspectos a mejorar en el presente proyecto, como lo son, la toma de datos y el rellenado del anillo interior.

El registro de los datos por parte de los estudiantes se realiza de forma manual como se aprecia en la figura 11. De igual forma el rellenado de los anillos figura 12, para este último durante la práctica se registraron varios inconvenientes, puesto que el operario golpeo la base de los anillos desprendiéndolos del suelo, ocasionando que el ensayo debiera reiniciarse.

De igual forma se evidencia los errores a la hora de tomar las mediciones, ya que, se presentan cambios en el ángulo de visión del operario y durante todo el transcurso de la práctica este es reemplazado en varias ocasiones.



Figura 11. Estudiantes recolectando datos de forma manual, práctica de infiltración. Fuente: Elaboración propia.



Figura 12. Rellenado de los anillos de forma manual. Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Tipo de infiltrómetro

El tipo de infiltrómetro seleccionado fue el de anillo doble, puesto que este abarca una mayor área que otros tipos de infiltrómetro, reduciendo de esta manera el número de ensayos necesarios para la caracterización de un suelo, teniendo en cuenta la variabilidad espacial del terreno, la realización de menos pruebas genera un ahorro de dinero y recursos (Prieto, Támara, & Peroza, 2006).

La K_{sf} determinada con infiltrómetro de anillo doble está basada en una solución analítica unidimensional, esta condición aunque limita la variación de las propiedades a la dirección de flujo, ofrece simplicidad, buenas aproximaciones y facilidad de extensión a casos multidimensionales. Esto último permite que el análisis de los datos sea posible a través de distintos modelos matemáticos (Cuadrado, Cadavid, Agudelo, & Sánchez, 2008).

El diseño de los anillos (anexo 2 y 3) cumple con lo establecido en la norma ASTM D 3385-03 (Sección 3.2.6).

Se consultaron los estudios de infiltración realizados anteriormente por estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica de manera manual. De esta forma se estimó la cantidad de

agua necesaria para el rellenado del anillo interior y cuantas veces se repite este proceso durante 5 horas, que es la duración del estudio. En ninguno de los informes que se consultaron se encontró una medida de la cantidad de agua necesaria para el anillo exterior. Debido a lo anterior se realizaron pruebas piloto con el fin de tomar las mediciones necesarias (Tabla 4).

Con la información del proceso de infiltración se consultó con expertos y en la literatura relacionada sobre el procedimiento de automatización. Se realizó una comparación entre los diferentes métodos y componentes con el fin de determinar cuál de estos se adapta mejor a las necesidades del presente proyecto.

Se buscó un sistema para el llenado del anillo interior y medir la variación del nivel en la altura de la columna de agua dentro de este, debe ser automático, contar con una buena precisión y que posea tolerancia a otros compuestos (como tierra, suciedad, entre otros). Poseer un suministro de energía que le brinde una autonomía de mínimo 5 horas de funcionamiento, lo que garantice la debida realización del experimento. Para el material de la regadera se seleccionó teniendo en cuenta, economía, capacidad de transportar líquido, facilidad de montaje, entre otros.

4.2.3. Diseños para la regadera

Para llegar al diseño final de la regadera se crearon varios bocetos:

El primer boceto se realizó con las conexiones y la tubería totalmente horizontal figura 13, de forma que abarcara en su totalidad la parte superior del anillo interior, no obstante la presión alcanzada por el agua y una mala instalación en la prueba in-situ generaba que parte de la regadera no funcionara, haciendo que el caudal se viera dirigido hacia algunos de sus orificios solamente, esto incumplía con el objetivo de evitar un daño en la estructura del suelo.

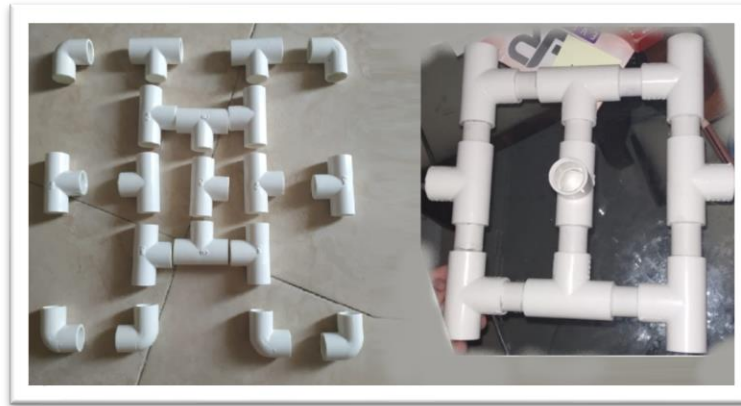


Figura 13. Primer boceto para regadera. Fuente: Elaboración propia

Para el segundo boceto se buscó que al elevar la entrada de agua, esta distribuyera el fluido de forma uniforme por todo el sistema figura 14, este diseño se presentó un nuevo problema y es que el volumen albergado por las tuberías, al momento de cerrar la electroválvula seguía llenando el anillo interior, lo cual generaba que las primeras medición después del rellenado se viera afectadas.



Figura 14. Segundo boceto de regadera. Fuente: Elaboración propia

En el último boceto se decidió implementar un sistema simple, con un bajo volumen de almacenamiento y que realizara una distribución homogénea del agua figura 15.



Figura 15. Boceto final para regadera. Fuente: Elaboración propia

Los parámetros para seleccionar se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de selección.

Parámetro	Descripción
Tipo de Infiltrómetro	Anillo doble
Anillos de infiltrómetro	Diseñados bajo la norma ASTM D 3385-03
Suministro de energía	5 horas de autonomía mínimo
Suministro de agua	El ensayo es realizado en un lugar sin acceso a agua por medio de alcantarillado
Materiales	Soportar las condiciones de trabajo en exteriores y cumplir los funciones necesarias
Componentes electrónicos	Automatización y toma de medidas flexible a otros elementos además del agua
Estructura de regadera	Suministrar agua al anillo interior y sostener los componentes electrónicos
Caudal	Necesario para llenar el anillo interior en un tiempo dado por el experto en el tema

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Diseño del infiltrómetro y sistema automatizado

Como primer paso se tomaron las medidas de los anillos (Anexo 2 y 3), tanto fuera como dentro del suelo y las medidas del nivel que alcanza el agua cuando se realiza el experimento. Esto se realizó para el anillo interno y el externo.

Con los volúmenes de llenado del anillo interior (Tabla 3) se calculó el caudal necesario para llenar este en un tiempo de 15 segundos. Se calculó el caudal necesario para cumplir lo anteriormente dicho por medio de la ecuación 3.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

Donde Q es el caudal en m/s, V el volumen en m³ y t el tiempo en segundos.

Usando la ecuación 3 se calculó la velocidad que lleva el fluido al entrar a la regadera.

$$Q = v * A \rightarrow v = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Donde Q es el caudal en m/s, v la velocidad del fluido en m/s y A el área de sección transversal por donde circula el líquido (Mott, 2006).

Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre la parte superior del tanque de suministro (expuesto al aire) y la entrada a la regadera se obtiene la ecuación 5 (Mott, 2006).

$$\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \quad (5)$$

Donde $\frac{P}{\rho}$ es la carga piezométrica, $\frac{V^2}{2g}$ la carga por velocidad y Z la diferencia de alturas. Si se

considera el punto más bajo como referencia y se cancelan todos los términos que son cero, se obtiene la ecuación 6.

$$Z = \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

De esta forma se encuentra la altura mínima que necesita el tanque de suministro para suplir el llenado del anillo interior.

Con el volumen necesario para el anillo interior en la duración total del ensayo (5 horas en promedio) se eligió un recipiente que brinde un suministro de agua de 40 litros (Tabla 2).

Con lo anterior mencionado se debe tener en cuenta el transporte del tanque o la manera de llenado que se debe usar.

Para el sistema de automatización se eligieron los componentes electrónicos por medio de comparaciones entre diferentes opciones existentes (Sección 5.2.1). Los factores a tener en cuenta para la selección fueron: economía, facilidad de obtención, montaje, dificultad de programación, precisión de medición, calibración y recolección de datos.

Para armar el sistema de automatizado se realizó primero un diagrama de circuitos (Figura 16) con todos los elementos y conexiones necesarias, así como la organización de los componentes.

Para el montaje de los circuitos se usó una caja para exteriores. El suministro de energía debe ser externo, desmontable y poseer una buena portabilidad. Por otra parte contar con una fuente de energía que genere calor muy cerca de los componentes electrónicos podría afectar la integridad del dispositivo.

El material de construcción del soporte para la caja de componentes eléctricos, debe contar con una resistencia decente, facilidad de montaje, resistir contacto constante con agua y tierra. Además de eso debe brindar una manera de transportar el agua desde el suministro a través de la electroválvula y depositarla a los anillos.

En el software SOLIDWORK 2017 se diseñó el sistema de tuberías (Sección 5.2.4) que soporta los componentes electrónicos y sitúan el lector en posición, esto se logró al ubicarlo directamente sobre el anillo. Para esto se consideró el volumen que debe llegar a la parte interior cada vez que se rellena el sistema. Para la división de los caudales se simuló el fluido usando la herramienta de SOLIDWORK Flow Simulation dentro de las tuberías partiendo del punto supuesto inicial (donde se encuentra la electroválvula), con lo que se encontró el caudal que llega a cada división del sistema de tubería. Con el fin de determinar si se hace necesario agregar piezas, las cuales se encargaran de distribuir de manera adecuada el agua. Con lo anterior se simuló el mismo diseño conceptual agregándole orificios a los tubos inferiores de forma que funcionen como aspersores.

Se simularon diferentes caudales de circulación sobre el sistema de tuberías descrito. Con esto se buscó observar los comportamientos del fluido en tal caso que la altura del tanque de suministro se modifique por condiciones del terreno. De esta manera se examinaron posibles errores causados por exceso de volumen.

Al completar el diseño de la regadera (sistema de tubería) se deben reajustar los parámetros utilizados en la programación del sistema de medida para adaptarlo a las medidas reales.

4.4. Construcción y Ensamble

En la figura 16 se puede observar el diagrama de circuitos que se siguió para la organización de los componentes electrónicos dentro de la caja para exteriores.

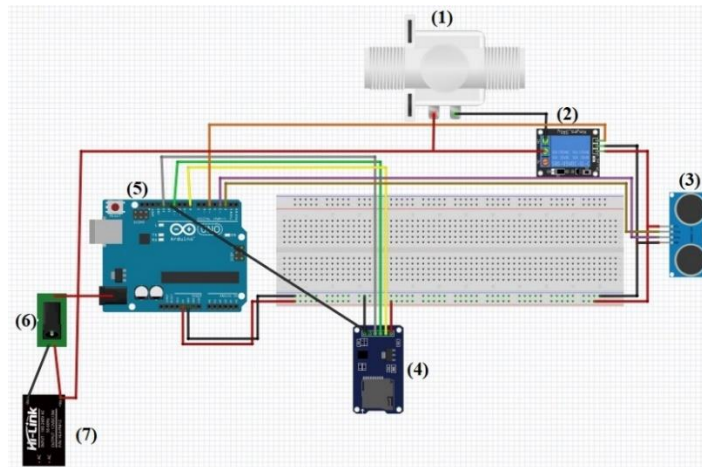


Figura 16. Diagrama de circuitos. 1) Electroválvula, 2) Relé, 3) Ultrasonido, 4) Lector SD, 5) Arduino, 6) Interruptor, 7) Batería. Fuente: Elaboración propia

Para el armado del sistema de medición automático se comprobó que cada componente funcionara correctamente. Una vez se cuenta con todos los materiales, se realizan las conexiones pertinentes. Con los circuitos organizados de manera que puedan ser introducidos y fijados dentro de la caja para exteriores.

Se deben realizar orificios en la caja para sacar los puertos de conexión, suministro de energía y recopilación de datos.

Para la construcción de la regadera se siguieron los planos de construcción del proceso de diseño como se muestra en el anexo 1.

El ensamble final se realiza al momento de iniciar el ensayo, donde se debe conectar la caja de componentes a la regadera y conectar el suministro de agua a la caja de componentes. Una vez se verifique que todo se conectó correctamente se da acceso de agua a la electroválvula y se puede iniciar el proceso de infiltración.

4.5. Realización de ensayos de campo

Los ensayos de campo se realizaron en dos tipos de suelo (arenoso y húmico), para comprobar el funcionamiento del dispositivo y rectificar las condiciones de funcionamiento.

Para el montaje del infiltrómetro primero se eligió la posición, teniendo en cuenta que el terreno sea plano y no tenga modificaciones.

En la figura 17 se muestra la ubicación de los anillos junto a la placa de conducción.



Figura 17. Anillos y placa de conducción. Fuente: Elaboración propia

La placa de conducción posiciona los anillos de manera concéntrica y presta soporte para golpear e introducir de manera uniforme los anillos en el suelo como se muestra en la figura 18.



Figura 18. Anillos y posicionamiento para la placa de conducción.
Fuente: Elaboración propia

Una vez se ha fijado la profundidad indicada, se agrega agua al anillo exterior, luego se fija el dispositivo de automatizado del ensayo y se conecta al suministro de agua, como se muestra en la figura 19.



Figura 19. Montaje del dispositivo conectado al suministro de agua. Fuente: elaboración propia

Con el objetivo de realizar la validación de los datos se realizaran mediciones manuales al mismo tiempo que transcurre el ensayo. Se llena el anillo interior, para esto se hace de manera que no dañe la integridad del suelo.

En la figura 20 se muestra el montaje completo del sistema.



Figura 20. Montaje completo del sistema. Fuente: Elaboración propia

Se conecta el dispositivo de automatizado a un ordenador para monitorear en tiempo real la toma de datos y verificar que no presente errores, para esto se utilizó el programa PuTTY Release 0.73 que permite ver en tiempo real el almacenamiento de los datos en el dispositivo como se muestra en la figura 21.



Figura 21. Seguimiento en tiempo real del dispositivo. Fuente: Elaboración propia

El tanque de 40 litros se rellena las veces que se hagan necesarias. El ensayo finaliza cuando las medidas registradas por el operario tienden a ser constantes.

Para la determinación de la velocidad de infiltración se empleó la ecuación 7 (Pizarro, Flores, Sangüesa, & Martínez, 2017) el coeficiente I , a saber:

$$I = \frac{Dh * 600}{t} \quad (7)$$

Donde:

I : Velocidad de infiltración en mm/hr

Dh : Diferencial de altura de agua (cm)

t : Diferencial de tiempo (min)

4.6. Validación

Para la validación, se tuvieron en cuenta los datos obtenidos mediante las pruebas manuales realizadas por los estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica.

Se utilizó la prueba de Chi-Cuadrado ya que esta permite la comparación entre grandes grupos de datos, comparándolos de forma directa al separarlos de la siguiente manera, primero los datos “esperados” correspondientes a los obtenidos por parte de los estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica y los datos “reales” los cuales serán suministrados por el dispositivo. Esta prueba entrega como resultado un porcentaje que representara la coincidencia presente entre ambos. Se evaluaron las relaciones entre datos utilizando la prueba Chi cuadrado para comprobar la significación estadística, con un límite de decisión de 0.05 (Diaz , Arrieta, & Ramos, 2012; M & Arrieta, 2008; Pantoja & Roa, 2012).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Determinar parámetros de diseño

Al realizar las entrevistas con el ingeniero conocedor del tema se establecieron condiciones de realización del diseño:

- Tipo de infiltrómetro: de doble anillo siguiendo la norma ASTM D 3385-03.
- Tiempo de rellenado del anillo interior 15 segundos aproximadamente.
- El nivel mínimo de la columna de agua en el anillo interior debe ser de 100 mm.
- La presentación de los datos obtenidos por el dispositivo debe ser en un documento de texto para su posterior análisis por parte de los operarios.

De anteriores estudios se obtienen las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Volumen para suministro del rellenado.

	Estudio						Promedios
	1	2	3	4	5	6	
Total llenado en 300 minutos (mm)	401	199	328	602	544	325	415 ± 150
Total en litros	24,7	12,3	20,2	37,1	33,5	20,0	24,6 ± 9,2
Tiempo total de ensayo (min)	301	309	312	207	177	160	301 ± 122,9

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2 se presentan los datos obtenidos por parte de los estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica acerca del rellenado para el anillo interior del infiltrómetro, Con esta información se estimó el volumen de agua necesario en el suministro para brindar una autonomía considerable. Se observa que el promedio total de llenado fue de 24.6 litros y posee una desviación de 9.2 litros, la cual se puede considerar elevada. Se tiene en cuenta que los estudios se realizaron en diferentes lugares dentro de la Universidad de Córdoba, las condiciones del

suelo varían causando una alteración de las medidas de infiltración que se toman en cada punto (Alberto F. Gómez-Tagle R., 2008).

Tabla 3. Promedio de llenado para anillo interior.

Llenada	Estudio											
	1		2		3		4		5		6	
	Litros	mm	Litros	mm	Litros	mm	Litros	mm	Litros	mm	Litros	mm
1	3,4	56	3,7	60	5,5	90	5,8	95	3,4	55	2,3	37
2	3,4	55	3,2	52	4,8	78	4,9	80	2,4	39	3,4	55
3	3,4	55	2,9	47	5,1	83	3,8	61	3,1	51	3,2	52
4	3,8	62	2,5	40	4,7	77	3,7	60	3,0	48	3,4	55
5	3,1	50			4,9	80	2,6	43	3,0	48	4,1	67
6	4,1	67					3,4	56	3,2	52	3,6	59
7							3,8	62	3,0	48		
8							4,6	75	3,0	48		
9							4,3	70	3,1	51		
10									3,3	53		
11									3,1	51		
Promedio	3,5	58	3,1	50	5,0	82	4,1	67	3,0	49	3,3	54
Promedio general (litros)			3,7 ± 0,8									
Promedio general (mm)			60 ± 12									

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 3 se calculó el promedio de agua que se requiere para llenar el anillo interior cada vez que sea necesario durante la duración del ensayo de infiltración. El promedio general obtenido es de 3,7 litros con una desviación estándar de 0,8 litros.

Para el anillo externo se realizaron pruebas piloto con el fin de calcularla el volumen de agua necesario para el ensayo de infiltración. Los cuales son mostrados en la tabla 4.

Tabla 4 Llenado anillo exterior.

Llenado	Estudio	
	Litros	mm
1	16,21	80
2	16,21	80
3	10,13	50
4	8,11	40
5	8,11	40
6	10,13	50
7	4,05	20
8	4,05	20
Promedio	9,63	47,5
Total	77	380

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5 se resumen los criterios de diseño seleccionados anteriormente.

Tabla 5 Parámetros de diseño para el infiltrómetro.

Parámetro	Descripción
Suministro de energía	Batería 12 V
Suministro de agua	24,6 ± 9,2 litros
Materiales	Tubería PVC
Componentes electrónicos	Sistema Arduino
Tiempo de llenado	15 segundos
Caudal	Q=0,2166 l/s

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Diseño del infiltrómetro y sistema automatizado

En la anexo 2 y 3 se muestran las medidas de los anillos cuando son enterrados para comenzar el ensayo de infiltración. Con esto se calculó el volumen que se debe rellenar. Este volumen se contrasta con el mostrado en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen datos de ensayo piloto.

	Cantidad de agua	
Llenado	mm	Litros
1	57	3,5
2	58	3,6
3	58	3,6
4	56	3,5
5	53	3,3
6	57	3,5
7	58	3,6
8	57	3,5
Promedio	56 ± 2	3,5 ± 0,1

Fuente: Elaboración propia.

De los ensayos anteriores se encontró que en promedio el llenado es de $3,7 \pm 0,8$ litros, como se muestra en la tabla 3. En la tabla 6 se muestran los datos obtenidos en la prueba piloto, donde se obtuvo un promedio de $3,5 \pm 0,1$ litros por cada llenado del anillo interior. Con los datos anteriores se concluyó que el caudal de trabajo es $Q = 0,2166 \frac{l}{s} = 216670 \text{ mm}^3/s$.

La altura mínima desde la entrada de la regadera a la parte expuesta del tanque de suministro debe ser de 20 mm.

De la tabla 2 se conoce que el suministro necesario para el anillo interior es de $24,6 \pm 9,2$ litros en un tiempo de $301 \pm 122,9$ minutos. Esto para obtener una autonomía mínima de 5 horas. Para el anillo exterior se calculó un volumen de 77 litros por medio de ensayos piloto como se ve en la tabla 4.

5.2.1. Selección componentes electrónicos

Tabla 7. Comparación sistemas de medida.

Dispositivo	Economía	Rango (mm)	Precisión (mm)	Accesibilidad	Calibración
Ultrasonido	✓	0 - 5000	0.01	✓	x
Boya electrónica	x	0 – 30000	1	✓	✓
Limnígrafo	✓	0 - 1000	10	✓	✓
Sensor laser	x	0 - 300000	0. 25	✓	x

Fuente: (Vistronica S.A.S., 2016; OTT HydroMet, 2019; Solinst Canada Ltd, s.f.).

De los sistemas de medición descritos en la tabla 7 se optó por usar un ultrasonido, debido a que presenta una buena precisión a un relativo bajo precio y además no requiere de calibración. Se escogió un Arduino Uno, este se muestra en la figura 2, como microprocesador para el dispositivo ya que este cuenta con suficiente capacidad de procesamiento para controlar las funciones necesarias de automatización. Por otro lado, su programación es relativamente sencilla y posee un menor costo comparado con otras opciones del mercado; Raspberry, BeagleBone y PCDuino. Para el almacenamiento de los datos se eligió un módulo microSD, la cual se muestra en la figura 4, por su reducido tamaño y compatibilidad con la placa procesadora elegida. Para control de paso de flujo (agua) se usó una electroválvula de 12V, mostrada en la figura 3, por sus dimensiones, acción automatizada y disponibilidad en el mercado.

5.2.2. Consumo energético

Tabla 8. Consumo energético de componentes electrónicos.

Componentes	Cantidad	Consumo (kWh)	Consumo durante el ensayo(kW)	Consumo en mA
Electroválvula	1	0,012	0,06	320
Arduino Uno	1	0,01	0,05	50
Sensores Ultrasónicos	2	0,01	0,05	30
Relé	1	0,012	0,06	10
Módulo microSD	1	0,005	0,025	80
		Total	0,245	490

Extraído de (Electronilab, 2018; Zona Maker, 2018).

Con los datos mostrados en la tabla 8 se calculó el consumo energético total del dispositivo ($490\text{ mA} = 0,49\text{ A}$). La fuente de energía elegida fue una batería AKITA AKG2.5L 12V 9Ah recargable, la cual se muestra en la figura 22. Se estima mantenga el dispositivo funcionando un total de 18 horas y 25 minutos, para un total de 3 experimentos con duración de 300 minutos cada uno. Teniendo en cuenta el precio del kWh en la ciudad de Montería-Córdoba es de 491.83 pesos en el mes de noviembre del 2019 (Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P., 2019), el costo para cada recarga de la batería es de 433,79 pesos.



Figura 22. Batería AKITA AKG2.5L Fuente: Elaboración propia

5.2.3.Código

El Arduino Uno fue programado en el software ARDUINO 1.8.10 bajo las siguientes especificaciones:

- El intervalo de tiempo entre cada una de las mediciones es de 10 segundos.
- Los datos se deben registrar por medio del módulo microSD en la unidad de almacenamiento.
- Teniendo en cuenta el espesor del soporte y la distancia máxima entre el sensor y la columna de agua se estableció que a 100 mm cesara la toma de datos y abriera la electroválvula iniciando el proceso de llenado. Cuando el anillo interior está lleno, es decir, la distancia entre el sensor y la columna de agua es de 40 mm se cierra la electroválvula y reanuda la toma de datos.
- Los datos se registran en un archivo .TXT
- Los datos registrados se guardan en dos columnas tiempo y distancia.

El código es mostrado en el anexo 6.

5.2.4.Diseño de la regadera

La regadera se diseñó como se muestra en la figura 23. En tubos de PVC rígido para transporte de agua schelude 40 ya que este tipo de tubería soporta las velocidades y presiones de trabajo necesarias sin sufrir grandes pérdidas de carga locales o por accesorios (Tabla 5). Las uniones utilizadas fueron codos de 90 grados y tee's (RIVAL, 2018).

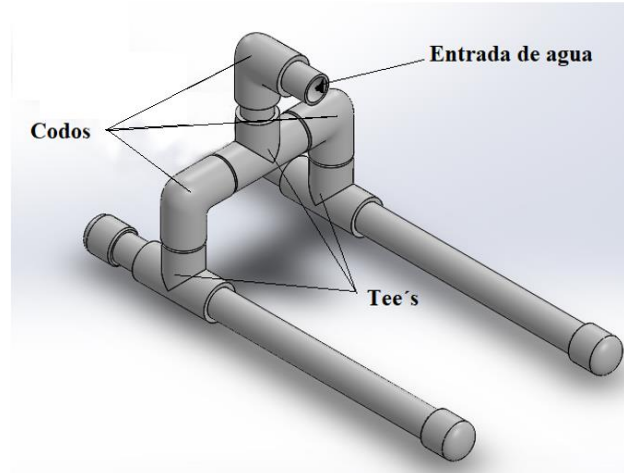


Figura 23. Diseño conceptual de la regadera. Fuente: Elaboración propia

En la figura 23 se muestra la entrada de agua, la cual funciona de soporte para la caja de componentes eléctricos, mientras que los tubos de la parte inferior funcionan como soportes y aspersores para distribuir el agua al anillo interior.

Con el volumen de trabajo previamente calculado se simuló el fluido a través de los tubos de la regadera para conocer los flujos volumétricos que tiene cada tubo.

En la figura 24 se muestra la simulación del agua en la regadera.

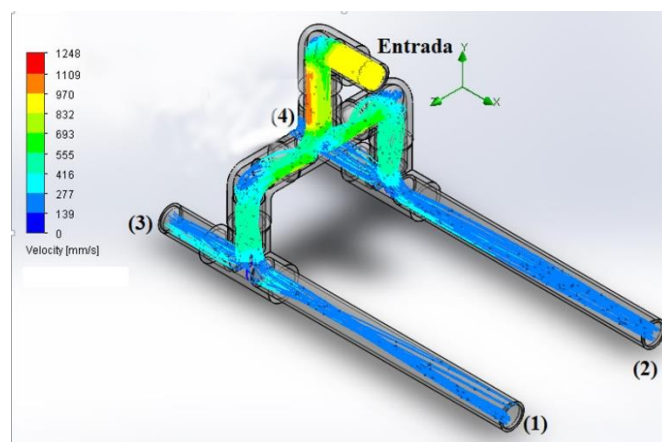


Figura 24. Simulation flujo en la regadera. Fuente: Elaboración propia

Con esto se estimó la distribución del caudal entrante a través de la regadera en el proceso de llenado. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Distribución de caudal dentro de la regadera.

Entrada	Caudal (mm³/s)	Salida	Caudal (mm³/s)	Distribución (%)
1	216670	1	52795	24,4
		2	55121	25,4
		3	55896	25,8
		4	52860	24,4

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 9 el caudal se dividió en 4 partes similares. Por medio de simulaciones se calculó el flujo que pasa a través de un orificio de 0,25 in, aproximadamente de 16000 mm³/s, lo que se calculó por medio de la ecuación 4. La velocidad fue hallada por medio de una simulación mostrada en la figura 25.

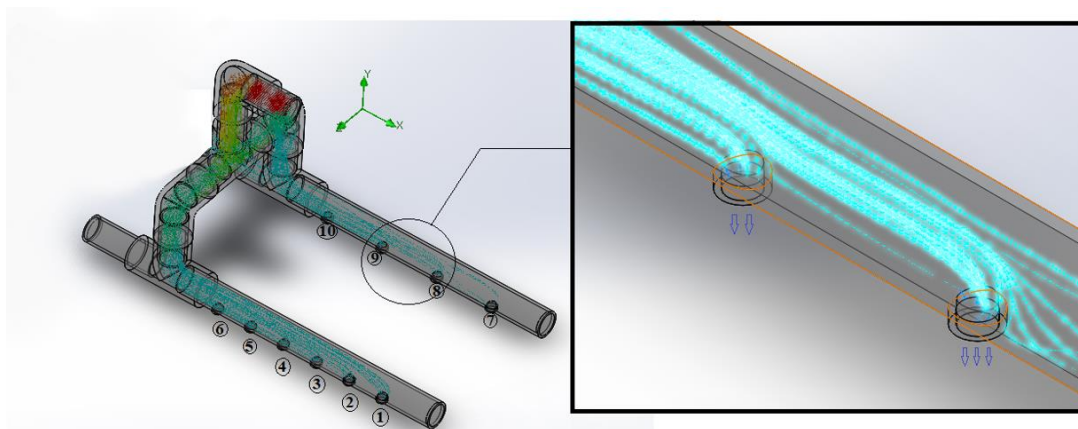


Figura 25. Simulación agua a través de la regadera con acercamiento. Los números representan los orificios. Fuente: Elaboración propia

En el anexo 1 se muestran los planos de construcción de la regadera.

Al colocar los orificios se repite la simulación cambiando la salida de agua a estos. Los extremos de los tubos se sellan en este caso. La figura 25 muestra como fluye el líquido a través de los aspersores. El volumen que sale por cada orificio es mostrado en la tabla 10.

Tabla 10. Distribución de flujo a través de los orificios de la regadera.

Salida	Caudal (mm ³ /s)	Salida	Caudal (mm ³ /s)
1	22809,3	6	19534,5
2	22615,9	7	22829,2
3	22431,2	8	22061,5
4	21235,5	9	22401,2
5	20257,2	10	21260,0

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 10 muestra el caudal de llenado para anillo interior, distribuido con el objetivo de no dañar la integridad del suelo. Estos valores representan un 18,1 % del caudal total simulado, lo que presenta una diferencia de 2,1% del valor previsto. Dicha variación no se considera significativa para afectar el proceso del ensayo de infiltración.

5.3.Construcción y Ensamble

Para la construcción del dispositivo se siguieron los planos establecidos en el anexo 4.

Utilizando el programa SOLIDWORDS 2017 se realizó una vista explosionada de los componentes como se muestra en la figura 26.

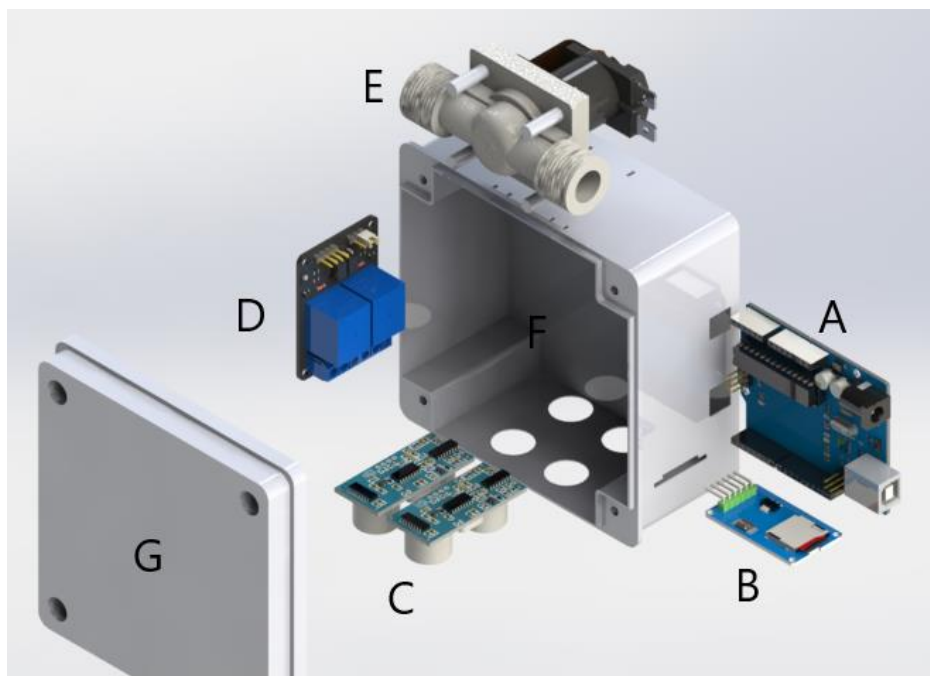


Figura 26. Vista explosionada del dispositivo, Arduino UNO (A), Lector microSD (B), Sensor de ultrasonido (C), Relee (D), Electroválvula (E), Caja para exteriores (F), Tapa de caja para exteriores (G). Fuente: Elaboración propia

En la figura 27 se muestra el montaje de los circuitos en la caja para exteriores.



Figura 27. Montaje de los circuitos en la caja de exteriores. Fuente: Elaboración propia

Al armar el circuito mostrado en la figura 16 (sección 4.4) en la caja de exteriores, se consideró la dirección de cada dispositivo, para que cumpliera con su función y se cuente con espacio para todas las conexiones entre componentes. Por medio de la aplicación de calor se crearon orificios en la caja de exteriores para los sensores del ultrasonido, conexión de la memoria microSD y conexión de corriente, como se muestra en la figura 28. Las conexiones se realizaron por medio de soldadura de estaño en los pines, siguiendo las conexiones establecidas en el diagrama del circuito, mostrado en la figura 16. La electroválvula se ubicó en la parte superior de la caja con el fin de conectarse a la regadera y al suministro de agua.



Figura 28. Orificios de salida para los puertos. Fuente: Elaboración propia

El montaje de la regadera se realizó siguiendo los planos de construcción mostrados en el anexo 1. Por medio de soldadura para tubos se fijaron en las posiciones requeridas de manera que al conectar la electroválvula esta pueda dejar pasar el flujo de agua y se distribuya correctamente. Para esto se rectificó que los tubos no presenten desniveles considerables, lo que ocasionaría una salida de flujo desequilibrada el montaje del dispositivo y la regadera es mostrado en la figura 29.



Figura 29 Montaje de dispositivo y regadera. Fuente: Elaboración propia

5.4. Realización de ensayos de campo

El ensayo de campo se realizó en dos tipos de terreno (arenoso y húmico). En la figura 17, (sección 4.5) se muestra el suelo arenoso donde fue realizado el experimento, en este se encontró que el dispositivo no realiza la toma de datos eficientemente, ya que este tipo de suelo presenta una velocidad de infiltración que retrasa el llenado del anillo interior, causando distorsión en las medidas tomadas, como se puede ver en la figura 30. Lo anterior se debe a que variaciones espaciales relativamente mínimas de las condiciones texturales del suelo pueden llegar a producir una importante variabilidad de las velocidades de infiltración (Pikul, Zuzel, & Wilkins, 1992; Iroumé & Schäfer, 2000).

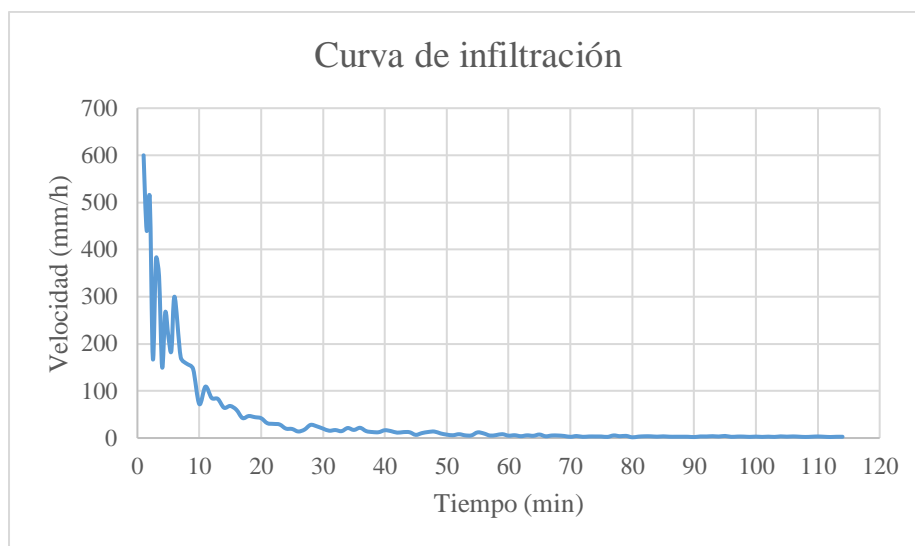


Figura 30. Curva de infiltración ensayo de campo suelo arenoso. Fuente: Elaboración propia

En el anexo 5 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de campo para el suelo arenoso. La realización de la prueba en el suelo húmico tuvo una duración total de 170 minutos. A partir de la gráfica mostrada en la figura 31 se puede observar que aproximadamente en el minuto 120 la velocidad de infiltración se vuelve constante, lo que da por terminado el ensayo (Batres & Palomo, 2016).

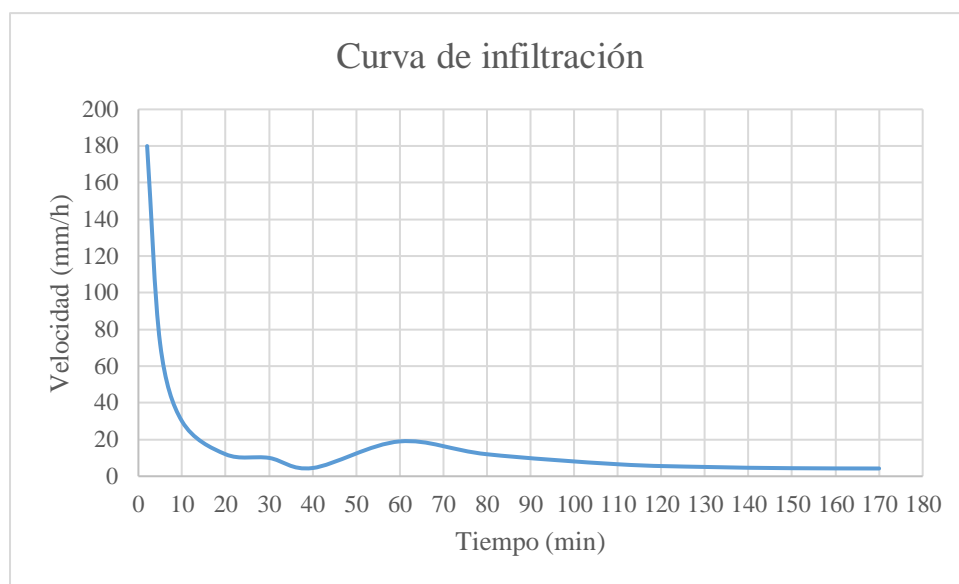


Figura 31. Curva de infiltración ensayo de campo suelo húmico. Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se muestra la curva de infiltración obtenida en la realización de ensayos de campo, esta se observa como una línea decreciente en el tiempo que tiende a ser constante a medida que avanza el tiempo. El tiempo que tarda la gráfica en ser constante depende del tipo de suelo en el que se realice la prueba.

5.5. Validación

Los ensayos realizados por los estudiantes del programa de Ingeniería Agronómica dan como resultado la curva de infiltración mostrada en la figura 32 (a), y en la figura 32 (b) se presenta la curva de infiltración obtenida por medio del dispositivo de medición.

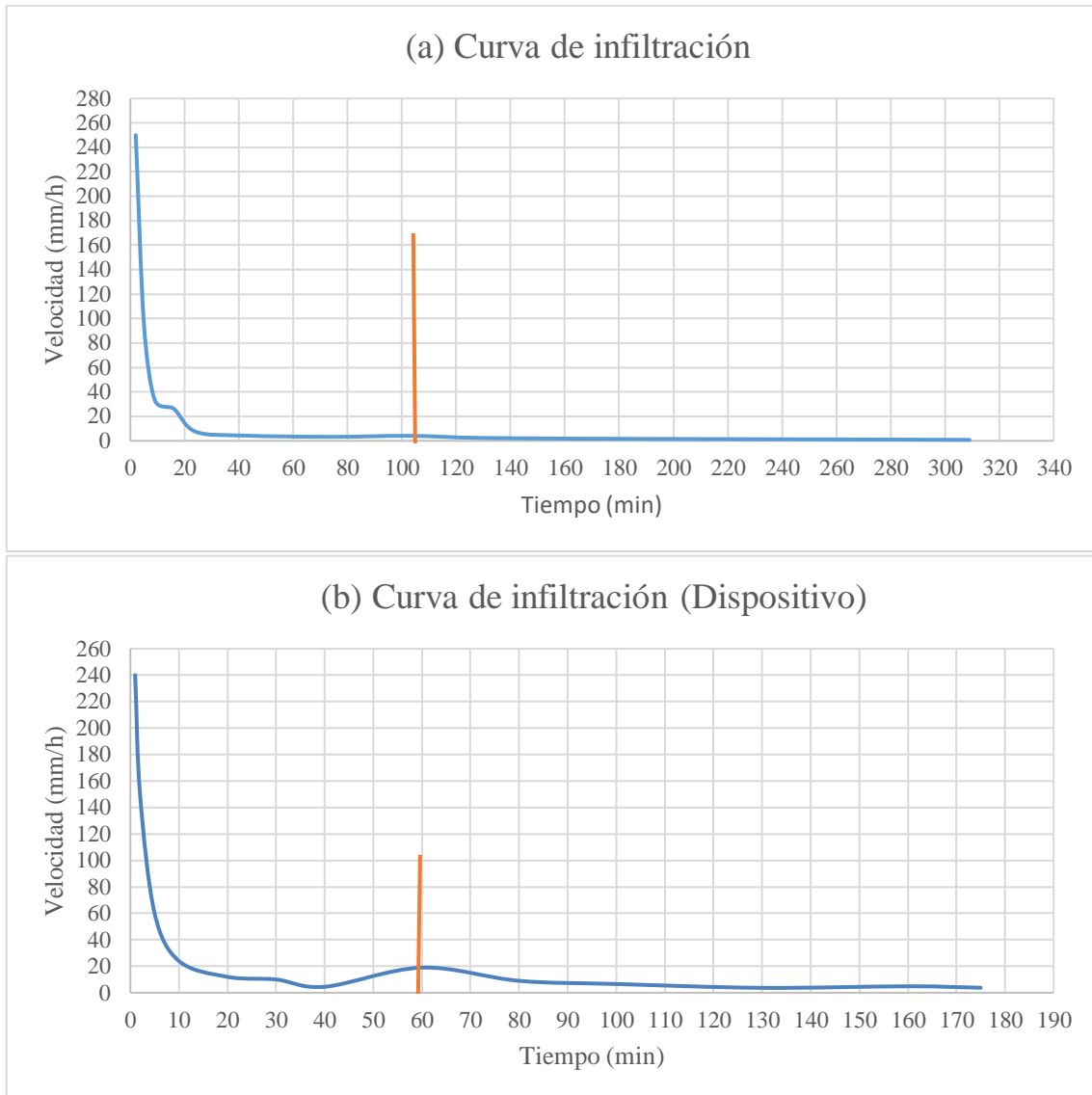


Figura 32. Curvas de infiltración. (a) Datos manuales estudiantes del programa de ingeniería agronómica, (b) Datos con dispositivo. Fuente: Elaboración propia

En ambas curvas se presenta un inicio elevado, seguido de un gran decrecimiento en los primeros minutos de realización del ensayo, esto es común en este tipo de gráficas como se puede ver en los estudios realizados por (Sartika, y otros, 2018; Radhi , 2018). Seguido a esto se evidencia un decrecimiento leve de manera constante, sigue de esta forma hasta que se presenta una perturbación a manera de aumento en el momento en que el intervalo para la toma de mediciones crece, esto se indica con una línea en las figuras 32 (a) y (b), este comportamiento también se evidenció en (Radhi , 2018; Pizarro, Flores, Sangüesa, & Martínez, 2017).

Los resultados del análisis comparativo no paramétrico (prueba chi cuadrada) que se realizó para comparar los datos obtenidos con el dispositivo y de manera manual se muestran en la tabla 11 y 12.

Tabla 11. Prueba chi-cuadrado, datos dispositivo vs datos manuales en pruebas piloto suelo arenoso.

Medición	σ Promedio (mm)	Chi-Cuadrado
1	4,3	0,97
2	7,5	0,87
3	7,6	0,90
4	5,3	0,89
5	7,3	0,98
6	7,4	0,87
7	6,4	0,96
8	6,1	0,92
9	4,1	0,99
10	3,6	0,99
11	4,0	0,99
12	3,1	1,00
13	3,3	1,00
14	2,9	1,00
15	4,0	1,00
16	2,7	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Prueba chi-cuadrado, datos dispositivo vs datos manuales en pruebas piloto suelo arenoso.

Medición	σ Promedio (mm)	Chi-Cuadrado
17	3,0	1
18	2,5	1
Promedio	5,3	0,96

Fuente: Elaboración propia

La hipótesis nula H_0 se corresponde a que las diferencias entre las frecuencias observadas y esperadas son muy pequeñas, y en consecuencia, el estadístico chi-cuadrado también obtendrá un valor cercano a cero. Para este caso se busca el cumplimiento de la hipótesis alternativa, la cual implica un valor de chi-cuadrado mayor o igual al 0.95. En las tablas 11 y 12 se observan valores de 0.87 y 0.89 respectivamente, los cuales se encuentran por debajo del valor mínimo, no obstante no representan un error considerable o un fallo en el dispositivo ya que estos pueden representar una mayor exactitud de medición que no se puede lograr de forma manual debido a los errores inherentes que presenta este proceso. Los chi-cuadrado promedio obtenidos fueron de 0.96 y 0.97 para los ensayos en suelo arenoso y húmifero respectivamente, lo que indica una diferencia estadística pequeña entre los valores observados y esperados. Con lo anterior se da cumplimiento a la hipótesis alternativa ($H_a: X^2 \geq 0.95$) y a las especificaciones requeridas por el ingeniero experto del programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Córdoba.

Tabla 13. Prueba chi-cuadrado, datos dispositivo vs datos manuales en pruebas piloto suelo
humífero.

Llenado	σ Promedio (mm)	Chi cuadrado
1	29	1,00
2	24	1,00
3	22	1,00
4	82	0,92
5	53	0,92
6	45	0,97
7	47	1
8	46	0,99
9	51	0,89
Promedio	44	0,97

Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

De este trabajo se puede concluir que:

- Se construyó un infiltrómetro de anillo doble automatizado que permite realizar ensayos de infiltración mediante un sistema de toma de datos y autorrellenado en el nivel de la columna de agua del anillo interior.
- Se establecieron parámetros de diseño que cumplen con los requerimientos para el dispositivo.
- La validación de los datos demostró la utilidad del dispositivo mediante una comparativa frente a datos tomados de forma manual.
- El diseño de los anillos del infiltrómetro se encuentra bajo la norma ASTM D3385-03
- A través de simulaciones se diseñó y comprobó el funcionamiento de los soportes (regadera) de forma eficiente y sin gastos asociados.
- El funcionamiento del dispositivo es afectado por el tipo de suelo en el cual se realice el ensayo.
- El costo de fabricación del dispositivo es relativamente económico.
- El dispositivo funciona correctamente el tipo de suelo presente en la Universidad de Córdoba y presenta una autonomía de 18 horas.

7. RECOMENDACIONES

- Para dar inicio al ensayo, el primer llenado de los anillos se debe realizar de forma manual.
- El rellenado del anillo exterior se realiza de forma manual puesto que para este no es necesario tener ninguna consideración en su nivel aparte de que este no debe llegar a cero.
- Realizar los ensayos en un tipo de suelo que no posea una alta velocidad de infiltración.
- El dispositivo cuenta con varios componentes electrónicos por lo cual no debe ser expuesto a contacto con el agua.
- El dispositivo almacena los datos de forma continua sobre un archivo de texto aunque cada dato posea una medición de tiempo y nivel, se debe retirar el almacenamiento y borrar su contenido para la realización de un nuevo ensayo, esto con el fin de que al momento de exportar los datos para su análisis, todos los datos registrados sean de un mismo ensayo.
- Posicionar el dispositivo de forma horizontal.

REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

- Abdelbaki, A. M. (2016). Using automatic calibration method for optimizing the performance of Pedotransfer functions of saturated hydraulic conductivity. Sciencedirect.
- Amézketa, E., Gazol, R., Aragüés, R. (2002). Desarrollo De Un Infiltrómetro Automático Y Su Aplicación En Campo. Vol. 17. Unidad de Suelos y Riegos. S.I.A. - D.G.A.
- Amoozegar, A. (1992). Compact constant head permeameter: a convenient device for measuring hydraulic conductivity. pp. 31–42. *In*: G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green (eds.). Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA
- Alberto F. Gómez-Tagle R., B.-S. Z. (2008). Conductividad hidráulica saturada de campo: Uso de un infiltr+ometro de carga constante y anillo sencillo.
- Armanda, E., Montúfar, C. (2015). Determinación De La Permeabilidad De Los Suelos Basados En La Metodología Del Infiltrómetro De Mini Disco En La Zona De Yanahurco, Napo. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Barbecho, J. y Calle, J. (2012). Caracterización De La Conductividad Hidráulica De Los Suelos De La Subcuenca Del Río Tarqui. Universidad De Cuenca. Ecuador. Tomado De: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/771/1/ti897.pdf>
- Barbecho, J. y Calle, J. (2000). Geología aplicada a la Ingeniería Civil. Mexico: LIMUSA.
- Batres, C., & Palomo, M. (2016). Comparación de tres metodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. Cuadernos de Investigación UNED.

- Cabezas, D., Carrasco, F., & Mafla, E. (s.f.). El riego, La Producción Y El Mercado. Programa De Capacitación A Promotoras Y Promotores Campesinos. Coordinación CESA Consorcio Camaren.
- Campos, I. G. (2009). Diseño Y Construcción De Un Infiltrómetro Automatizado Para Medición De Conductividad Hidráulica
- Campos–Aranda, D. F. 1992. Procesos Del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Candioti, L.A.; Mir, G.R. y Morin, J.J. (1980). Curso Internacional de Hidrología General con énfasis en hidrología subterránea. Almacenamiento y movimiento del agua en el suelo. FlyCH-UNL. Inédito.
- Cerquera, Y., López, G., Ramos, L. (2010). Diseño De Un Sistema Electrónico Digital Para Automatizar La Prueba De Capacidad De Infiltración Del Suelo En Campo. Vol. 7.Universidad Surcolombiana. Neiva.
- Córdoba, U. d. (s.f.). Universidad de Córdoba. Obtenido de Plan de estudios Programa de Ingeniería Agronómica: Unicordoba.edu.co
- Custodio, E. Y Llamas, M. (1983). Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona, España
- Davidoff, B. and H. M. Selim. (1986. Goodness of fit for eight water infiltration models. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 759–764.

De la Ossa, L., Garcés, K., Berona, N. y Martínez, E. (2019). Sistematización DE la Toma DE Datos En El proceso De Infiltración Del Agua En El Suelo Electronic Rule. Universidad De Córdoba. Facultad de Ingeniería. Montería, Córdoba.

Definición de Conductividad. (2019).Recuperado de:<https://conceptodefinicion.de/conductividad/>. Consultado el 21 de octubre del 2019.

Díaz, S., Arrieta, K., & Ramos, K. (2012). Impacto de la Salud Oral en la Calidad de Vida de Adultos Mayores. Rev Clin Med Fam.

Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P. (2019). Tarifas y Subsidios. Recuperado el 27 de 11 de 2019, de www.electrificaribe.co

Electronilab. (2018). Electronilab. Recuperado el 27 de 11 de 2019, de www.Electronilab.co

Fuente Sepúlveda, B, R. (2019). El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea. Recuperado de: 480-1786-1-PB.pdf

Gómez-Tagle Ch., Alberto, Gómez-Tagle R., Alberto F., Batlle-Sales, Jorge, Zepeda Castro, Hugo, Guevara Santamaría, Mario A., Maldonado L., Selene, & Pintor A., J. (2008). Conductividad Hidráulica Saturada De Campo: Uso De Un Infiltrómetro De Carga Constante Y Anillo Sencillo. Terra Latinoamericana, 26(4), 287-297. Recuperado El 14 de octubre de 2019de:http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-

Gómez-Tagle Chávez, Alberto, Gutiérrez Gnechi, José Antonio, & Zepeda Castro, Hugo. (2010). Automation device for a Mariotte based field infiltrometer. Terra Latinoamericana, 28(3),193-202.Recuperadode

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792010000300001&lng=es&tlng=en.

Chávez, G. (2009). Diseño Y Construcción De Un Infiltrómetro Automatizado Para Medición De Conductividad Hidráulica. Recuperado de: <https://www.researchgate.net>

Group, Royal Eijkelkamp Earth Sampling (*s.f.*). Infiltrómetro de Anillo Doble. Tomado de: <https://sp.eijkelkamp.com/acerca-de-eijkelkamp/royal-eijkelkamp-foundation-sp/>

Heras, R. (1970). Manual de Hidrología”. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid.1970.

Hillel, D. (1971). Soil and water. Physical principles and procesos. Ed. Acad.Press. New York.

Horton, R. E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Proc.Soil Sci. Am., Pág. 399-417

IDEAM. (2018). Reporte de avance del estudio nacional del agua ENA 2018. Bogotá, DC: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

Iroumé, A., & Schäfer, M. (2000). VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA INFILTRACIÓN EN UNA CUENCA EXPERIMENTAL EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES, IX REGIÓN, CHILE. CIENCIA AGRARIA, 1-9. doi:10.4206/agrosur.2000.v28n2-01

Jaramillo, j., (2013). Desarrollo E Implementación De Un Sitio Web Que Contenga Un Laboratorio Virtual Basado En Cinco Modelos De Infiltración Hidrológica Que Permitan El Cálculo Automatizado Y La Toma De Decisiones Para Obras Civiles En La Consultora Del Ingeniero Luis Enrique Benavides. Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero En Sistemas. Universidad Nacional De Loja, Ecuador.

Johnson, E. (1975). El agua subterránea y los pozos. New York: Wheelabrator. Clean WaterInc.

J. Tindall, A. K. (1999). Unsaturated zone hydrology for Scientists and Engineers. New Jersey, USA.

Leopoldo, J., Andreau, R., Etcheverry, M., Etchevers, P., Chale, W., Calvo, L. Y Ramos, F. (2017). Hidrología aplicada al estudio y manejo de cuencas y de sistemas de riego y drenaje: Aplicación de metodologías para la medición y estimación del escurrimiento y la infiltración. N° 2. Pág. 1-28. Tomado de: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/15618/mod_resource/content/2/unidad%202%202017.pdf

M, K., & Arrieta, V. (2008). Consumo patológico de alcohol entre los estudiantes de la Universidad de Cartagena. Revista de Salud Pública.

Materials., A. –A. (1978). ASTM D 3385 – 03 Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer.

Materials. A. –A. (1978). Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. ASTM D 3385 – 03

Material, American Society for Testing (1978). Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer

Mendivelso, F., y Rodríguez, M.(2018). Prueba Chi-Cuadrado De Independencia Aplicada a Tablas 2Xn 2 MD. Fundación Universitaria Sanitas. Tomado De: http://www.unisanitas.edu.co/Revista/67/05Rev_Medica_Sanitas_212_FMendivelso_et_al.pdf

- Montería, C. d. (2017). Estudio Económico Departamento DE Córdoba.
- Ñunez, E. (1998). Geología del Ecuador. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior
- OTT HydroMet. (24 de 11 de 2019). Obtenido de www.ott.com
- Pantoja, L., & Roa, E. (2012). Factores relacionados con el diagnóstico de la tuberculosis mediante la prueba Chi-cuadrado para Bogotá (Colombia). Ing. Ind.
- Pikul, J., Zuzel, J., & Wilkins, D. (1992). Infiltration into frozen soil as affected by ripping. Transactions of the ASAE, 83-90.
- Pirzarro, R., Flores, P., Sangüesa, C., & Martínez, E. (2017). Curva de infiltración. Sociedad Estándar de Ingeniería para Aguas y Suelos LTDA.
- Porta Casanella, J. et al. (1999). Edafología Para La Agricultura Y El Medio Ambiente. ED. Mundi-Prensa 2º edición, Madrid.
- Radhi , A. A. (2018). Vertical Hydraulic Conductivity of Unsaturated Zone by Infiltrometer Analysis of Shallow Groundwater Regime (KUISG). Journal of University of Babylon, Engineering Sciences, 185-194.
- Rodrigues Pinheiro, E. A., Van Lier, Q. d., Inforsato, L., & Simunek, J. (2019). Measuring full-range soil hydraulic properties for the prediction of crop water availability using gamma-ray attenuation and inverse modeling.
- Roman, F. J. (Diciembre de 2009). Flujo en medios porosos: Ley de Darcy. Espana: <http://web.usual.es/javisan/hidro>. Obtenido de: <http://web.usual.es/javisan/hidro>

- Ruiz, E. y Martínez, M. (2017) Hidrología Aplicada Tema. Infiltración Y Humedad Del Suelo. Tomado de: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/12930/mod_resource/content/1/2%20Infiltraci%C3%B3n2016-2.pdf
- Sartika, D., Mustakim, I., Nurachman, E., Nurpaidah, L., Ferdiansah, R., Ammar, M., & Sitepu, R. (2018). Measurement and modeling of infiltration rate at campus area- University of Nusa Putra, Sukabumi.
- Smedt, F. D. (2008). Groundwater Modelling. Vrije University Brussels . Brussels, Belgica: Lecture Notes (Unpublished).
- Solinst Canada Ltd. (s.f.). Recuperado el 24 de 11 de 2019, de www.solinst.com
- Springall R. (1976). Hidrología. Universidad Autónoma de México. 1976.
- William Lambe, R. W. (1995). Mecánica de suelos. Massachusetts: Instituto Tecnológico de Massachusetts.
- Zona Maker. (2018). Zona Maker. Recuperado el 27 de 11 de 2019, de www.zonamaker.com
- Zhengchao, T., Dilia Kool, Tusheng, R., Horton, R., & Heitman, J. L. (2018). Determining in-situ unsaturated soil hydraulic conductivity at a fine depth scale with heat pulse and water potential sensors. Sciencedirect.
- Zhongwei, H., Mohamad, H., Qiuhong, T., Vernon, C. R., Yaling, L., Min, C., & Kate, C. (2019). Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes. Sciencedirect
- (2016). Recuperado el 24 de 11 de 2019, de Vistronica S.A.S.: www.vistronica.com

WEBGRAFÍA

https://techlandia.com/conductividad-hechos_102837/

<https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm>

<http://www.barcelonaworldrace.org/es/educacion/programa-educativo/explora/navegacion/el-imoca-60/apendices/los-origenes-de-la-hidraulica>

<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/01/21/que-es-arduino-3/>

<https://www.monografias.com/trabajos13/valvu/valvu.shtml>

http://www.asconumatics.eu/images/site/upload/_es/pdf1/00009es.pdf

https://www.asconumatics.eu/images/site/upload/_es/pdf1/00005es.pdf

<https://naylorlampmechatronics.com/modulos/35-modulo-sd-card.html>

<https://www.mactronica.com.co/modulo-sd-43672881xJM>

<https://definicion.de/relevador/>

<file:///Users/andresperalta/Downloads/6153-Texto%20del%20art%C3%ADculo-21418-1-10-20140322.pdf>

<http://www.electronicasi.com/como-funciona/ultrasonido/>

<https://www.pol.com.co/optimizar-sistematizar-automatizar/>

<https://concepto.de/suelo/#ixzz631xeZRSV>

<https://sp.eijkelkamp.com> y <https://www.turf-tec.com>.

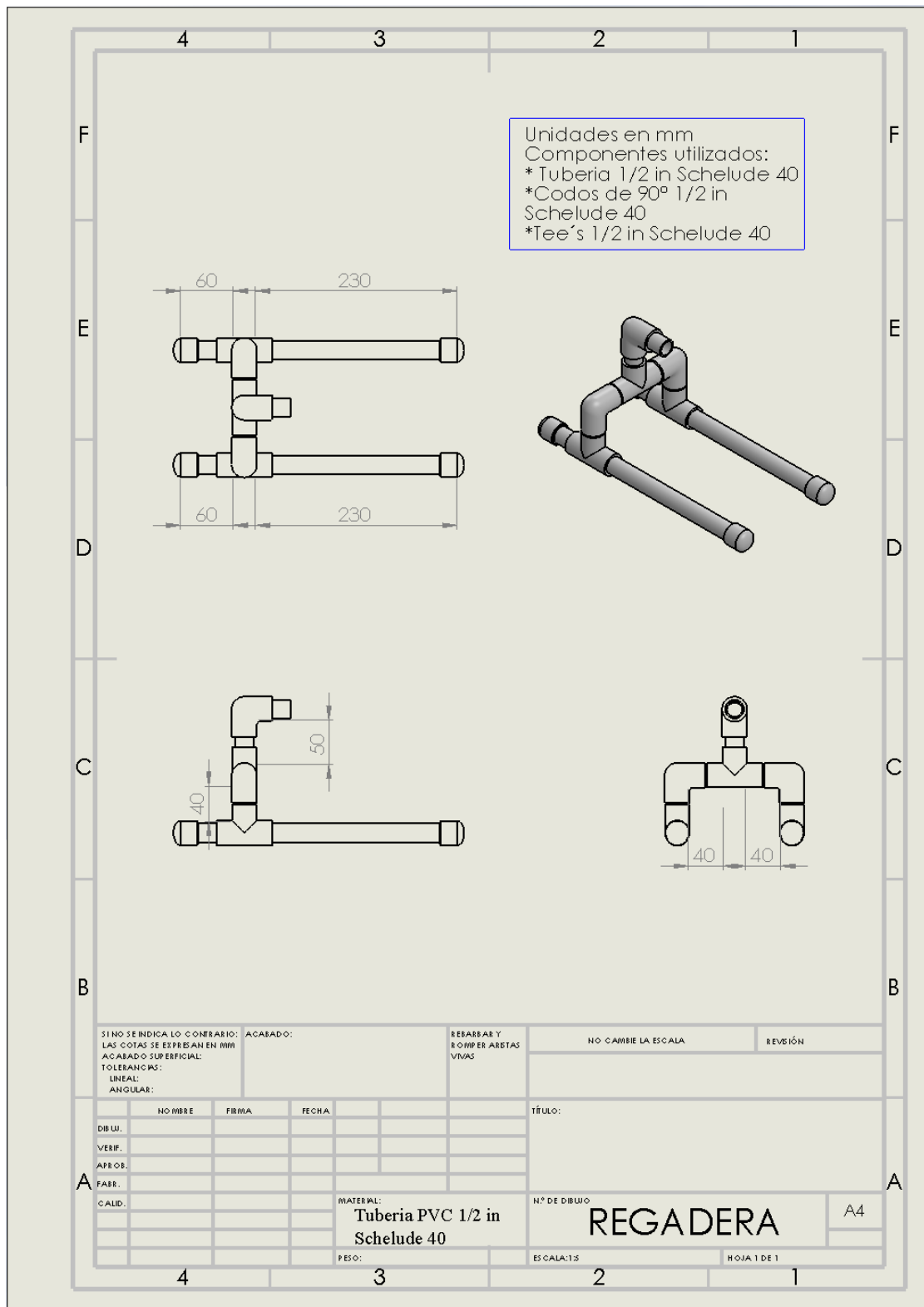
<https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm#ixzz631h2OUeD>

http://www.geologging.com/spanish/news/news_archive.htm. Obtenido de

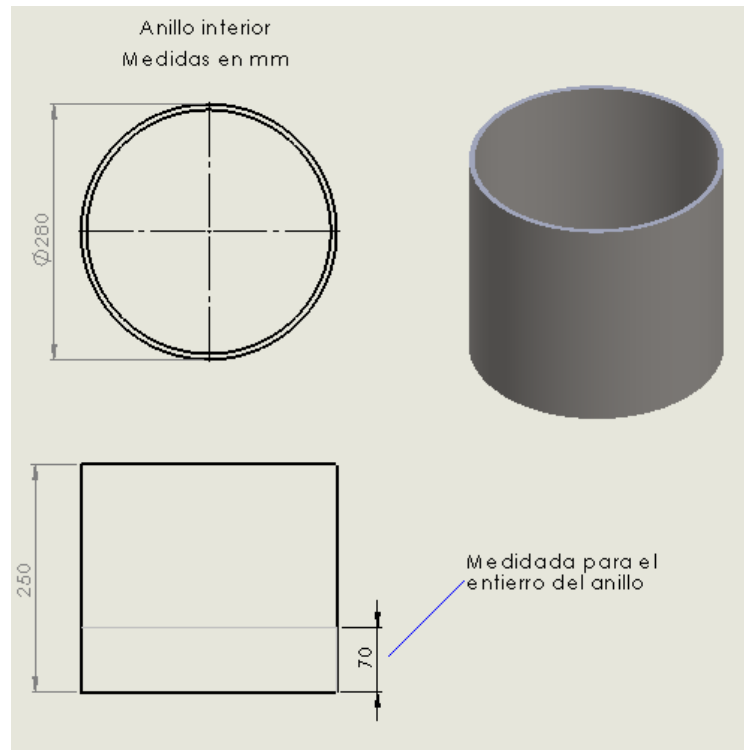
http://www.geologging.com/spanish/news/news_archive.htm

ANEXOS

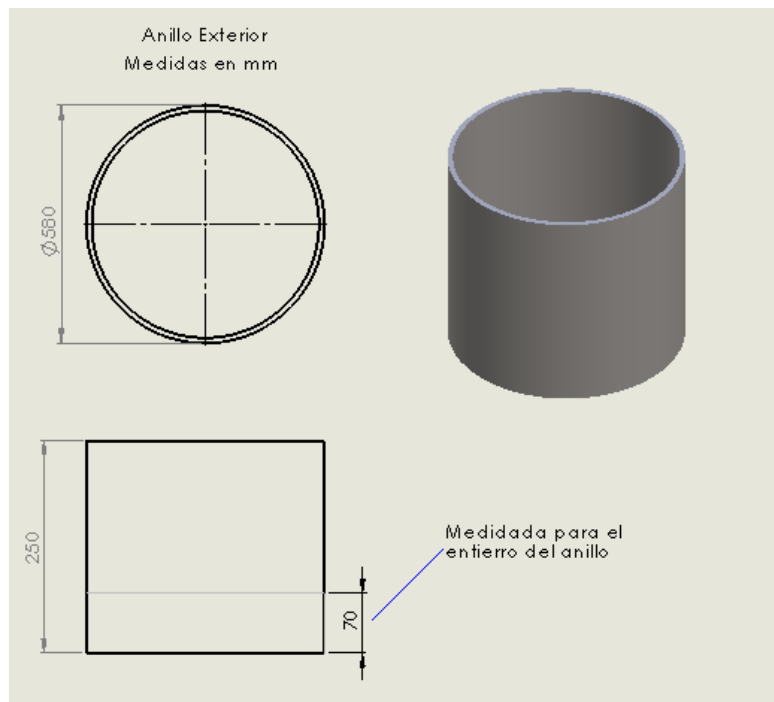
Anexo 1. Planos de la regadera en SOLIDWORKS



Anexo 2. Medidas de anillo interior en mm. Fuente: Elaboración propia.



Anexo 3. Medidas anillo exterior. Fuente: Elaboración propia



Caja para exteriores
Unidades en mm
Material PVC

112

112

48

3.60

1

2

10

10

16,70

24,70

31,25

37,75

1,50

3,50

5

R5

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

TÍTULO:

Caja para exteriores

Nº DE DIBUJO

Caja para exteriores

HOJA 1 DE 1

ESCALA: 1:2

MATERIAL:

PVC

PERO:

3

4

2

1

A4

VER. F.

APROB.

PA. BR.

CALID.

HOMBRE

FIRMA

FECHA

REBARBAR Y ROMPER A BORTAS VMA/S

ACABADO:

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

ACABADO SUPERFICIAL:

TO LEER HOYAS:

LINELA:

ANGULAR:

Anexo 5. Resumen Datos dispositivo ensayo de campo en suelo arenoso. Fuente: Elaboración propia

N°	Datos	σ	L.P	N°	Datos	σ	L.P	N°	Datos	σ	L.P	N°	Datos	σ	L.P
1	3,90			9	3,90			13	8,69	0,24	0,79	16	7,55	0,28	0,55
	4,98	0,65	1,08		4,97	0,62	1,07		9,27	0,34	0,58		8,02	0,24	0,47
	6,31	0,44	1,33		6,32	0,49	1,35		9,75		0,48		8,18	0,32	0,16
	7,76	0,62	1,45		7,43	0,29	1,11	14	3,90				8,70	0,14	0,52
	8,74	0,02	0,98		8,31	0,36	0,88		4,48	0,25	0,58		8,90	0,22	0,20
	9,51		0,78		9,21	0,28	0,90		5,27	0,37	0,79		9,36	0,18	0,46
2	3,90			10	9,70		0,49		6,05	0,37	0,78		9,68		0,32
	5,45	0,84	1,55		4,05			15	6,78	0,29	0,73	17	4,10		
	8,09	0,67	2,65		4,74	0,44	0,69		7,50	0,35	0,72		4,31	0,31	0,21
	9,11		1,02		6,13	0,40	1,39		8,14	0,33	0,64		4,83	0,37	0,51
3	3,96			11	7,27	0,34	1,15		8,77	0,16	0,62		5,35	0,34	0,53
	6,15	1,06	2,19		8,32	0,41	1,05		9,38	0,21	0,61		5,91	0,32	0,56
	8,32	0,46	2,17		9,24	0,23	0,92		9,75		0,37		6,56	0,30	0,65
	9,55		1,23		9,75		0,51		4,10				7,13	0,35	0,57
4	3,96			12	4,10			16	4,29	0,49	0,19		7,53	0,32	0,41
	7,20	1,53	3,24		4,74	0,41	0,64		4,89	0,40	0,60		8,12	0,36	0,58
	9,19		1,99		6,08	0,39	1,34		5,64	0,33	0,75		8,61	0,24	0,49
5	3,96				7,22	0,47	1,14		6,16	0,51	0,52		8,91	0,19	0,30
	6,10	0,83	2,14		8,14	0,38	0,92		6,68	0,40	0,52		9,36	0,19	0,45
	8,18	0,62	2,09		9,08	0,37	0,94		7,17	0,27	0,49		9,74		0,38
	9,60		1,42		9,60		0,52		7,58	0,27	0,41	18	3,94		
6	4,36			13	4,20				8,06	0,34	0,48		4,39	0,12	0,45
	5,74	0,61	1,38		4,77	0,40	0,57		8,43	0,52	0,37		4,91	0,31	0,52
	7,77	0,86	2,03		5,71	0,38	0,95		8,87	0,52	0,44		5,36	0,28	0,45
	9,75		1,98		6,72	0,33	1,00		9,22	0,59	0,34		5,90	0,21	0,54
7	4,16				7,45	0,29	0,74		9,37	0,18	0,16		6,48	0,22	0,58
	5,12	0,70	0,96		8,32	0,22	0,86	17	9,70		0,33		7,04	0,34	0,56
	6,95	0,65	1,83		9,11	0,27	0,79		4,01				7,50	0,36	0,47
	8,86	0,57	1,91		9,65		0,54		4,16	0,16	0,15		8,04	0,34	0,53
	9,85		0,99		4,20				4,82	0,09	0,66		8,39	0,28	0,36
8	4,01				4,58	0,35	0,38		5,29	0,29	0,47		8,92	0,13	0,53
	5,04	0,76	1,03		5,68	0,38	1,11		5,62	0,34	0,33		9,36	0,17	0,44
	7,06	0,64	2,03		6,35	0,38	0,67		6,14	0,42	0,52		9,68		0,32
	8,75	0,44	1,68		7,18	0,34	0,83		6,65	0,46	0,50				
	9,65		0,91		7,89	0,26	0,72		7,01	0,40	0,36				

Anexo 6 Código de automatización del dispositivo. Fuente: Elaboración propia.

```
#include <pt.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

struct pt hilo1;
struct pt hilo2;

#define Pecho 3
#define Ptrig 2

long duracion;
float distancia,dista-;

#define Pinecho 4
#define Pintrig 5
long dura;

#define SSpin 6
File archivo;
int a;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  PT_INIT(&hilo1);
  PT_INIT(&hilo2);
}

void loop() {

llenar(&hilo1);
guardar(&hilo2);
}

void llenar(struct pt *pt){
  PT_BEGIN(pt);
  static long t = 0;

  pinMode(Pecho, INPUT);
  pinMode(Ptrig, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);

  do{

    digitalWrite(Ptrig, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(Ptrig, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(Ptrig, LOW);
    duracion = pulseIn(Pecho, HIGH);
    distancia = (duracion* 0.000001 * 34000.0
/ 2.0) - 0.006;

    t = millis();
    PT_WAIT_WHILE(pt, (millis()-t)<500);

    if ( distancia >= 10){
      Serial.print("llenando");
```

```

a = 1;
digitalWrite(9, HIGH);
}
if (distancia < 4){
digitalWrite(9, LOW);
Serial.print("ya se lleno");
a = 0;
}
}while(true);

PT_END(pt);
}

void guardar-(struct pt *pt){
if (a == 0){
PT_BEGIN(pt);
static long t = 0;

//void setup()

pinMode(Pinecho, INPUT);
pinMode(Pintrig, OUTPUT);
do{
Serial.println("Inicializando tarjeta ...");
if (!SD.begin(SSpin)) {
Serial.println("fallo en inicializacion !");
return;
}
Serial.println("inicializacion correcta");
archivo = SD.open("dat.txt",
FILE_WRITE);
//voy loop()

digitalWrite(Pintrig, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(Pintrig, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(Pintrig, LOW);
dura = pulseIn(Pinecho, HIGH);
dista = (duracion* 0.000001 * 34000.0 /
2.0) - 0.006;
if((dista >= 3.9)&&(dista <= 10.1)){
Serial.println(dista);
Serial.println(t/1000);
//archivo.print("distancia");
archivo.print(dista);
archivo.print(";");
//archivo.print("Tiempo");
archivo.print(t/1000);
archivo.print(";");
archivo.println(" ");
}

t = millis();
PT_WAIT_WHILE(pt, (millis()-
t)<10000);
archivo.close();
}while(true);

PT_END(pt);
}

```

Anexo 7. Guía de uso y mantenimiento del Infiltrómetro automático. Fuente: Elaboración propia

No.	Consideraciones	
1	Verificar el estado de los componentes	
2	Enterrar los anillos del infiltrómetro en el suelo	
3	Unir el sistema de toma de medidas con el de rellenado	
4	Insertar en el puerto microSD el dispositivo de almacenamiento	

5	Conectar la fuente de alimentación al Arduino y a la electroválvula, automáticamente empieza el registro de datos	
6	Llenar de forma manual los anillos para dar inicio a la practica	
7	Posicionar el dispositivo sobre el anillo interior y al tanque de alimentación	
8	Verificar mediante el software PuTTY la transmisión de datos	

Anexo 8. Manual de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

El mantenimiento del correcto funcionamiento del infiltrómetro consiste en los siguientes ítems:

- 1) Siempre que se vaya a utilizar el dispositivo comprobar el estado de la caja para exteriores y que esta no presenta ninguna fisura.
- 2) Después de realizar la práctica de campo lavar de forma correcta los anillos, evitando que queden residuos de tierra en ellos.
- 3) Verificar la carga de la batería, se recomienda cargarla luego de la realización de 3 ensayos.
- 4) Asegurar que el dispositivo no entre en contacto con el agua mediante salpicaduras.
- 5) Verificar el voltaje de trabajo de cada parte del dispositivo mediante un multímetro.

Anexo 9. Datos prueba de campo con dispositivo, suelo húmico. Fuente: Elaboración propia.

t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D
0	3,90	370	8,21	740	4,36	1110	6,73	1480	8,94	1850	5,64	2220	8,27	2590	9,72	2960	6,47	3330	7,73
10	4,01	380	8,31	750	4,87	1120	6,78	1490	8,99	1860	5,76	2230	7,87	2600	3,90	2970	6,57	3340	7,65
20	4,98	390	7,54	760	4,98	1130	6,78	1500	9,04	1870	5,81	2240	7,97	2610	4,38	2980	6,62	3350	7,74
30	5,03	400	7,59	770	4,62	1140	7,29	1510	9,09	1880	5,45	2250	7,56	2620	4,36	2990	6,27	3360	7,78
40	4,77	410	8,10	780	4,67	1150	7,29	1520	8,75	1890	5,48	2260	7,59	2630	4,53	3000	6,32	3370	7,88
50	5,28	420	8,15	790	4,72	1160	7,39	1530	9,19	1900	5,55	2270	8,12	2640	4,57	3010	6,37	3380	7,92
60	4,98	430	8,26	800	4,77	1170	7,44	1540	9,24	1910	5,59	2280	8,19	2650	4,21	3020	6,85	3390	7,96
70	5,03	440	8,73	810	5,69	1180	7,49	1550	9,29	1920	6,11	2290	8,22	2660	4,26	3030	6,88	3400	7,99
80	5,13	450	7,98	820	5,33	1190	7,13	1560	9,33	1930	6,17	2300	8,27	2670	4,77	3040	6,93	3410	8,05
90	5,23	460	8,00	830	5,43	1200	7,19	1570	9,40	1940	5,81	2310	8,32	2680	4,84	3050	6,98	3420	8,15
100	5,38	470	8,10	840	5,08	1210	7,24	1580	9,45	1950	5,86	2320	7,97	2690	4,87	3060	7,10	3430	8,21
110	5,44	480	8,56	850	5,13	1220	7,69	1590	9,50	1960	5,91	2330	8,02	2700	4,99	3070	6,74	3440	8,29
120	5,59	490	8,63	860	5,18	1230	7,75	1600	9,53	1970	5,94	2340	8,07	2710	4,62	3080	6,73	3450	8,34
130	6,11	500	8,72	870	5,69	1240	7,81	1610	9,54	1980	6,01	2350	8,55	2720	4,67	3090	6,78	3460	8,45
140	5,79	510	8,41	880	5,79	1250	7,90	1620	9,40	1990	6,47	2360	8,60	2730	5,15	3100	6,82	3470	8,62
150	5,48	520	8,46	890	5,38	1260	7,95	1630	9,65	2000	6,59	2370	8,68	2740	5,20	3110	6,86	3480	8,67
160	6,00	530	8,87	900	5,48	1270	7,54	1640	9,70	2010	6,62	2380	8,66	2750	5,28	3120	6,91	3490	8,72
170	6,52	540	8,92	910	5,48	1280	7,59	1650	3,90	2020	6,27	2390	8,38	2760	5,33	3130	6,95	3500	8,82
180	6,20	550	8,97	920	5,54	1290	7,64	1660	3,90	2030	6,32	2400	8,73	2770	5,45	3140	7,01	3510	8,94
190	6,32	560	9,07	930	6,06	1300	8,12	1670	4,41	2040	6,37	2410	8,78	2780	5,50	3150	7,06	3520	9,05
200	5,94	570	8,72	940	6,10	1310	8,15	1680	4,46	2050	6,83	2420	8,80	2790	5,55	3160	7,12	3530	9,15
210	6,88	580	8,77	950	6,20	1320	8,27	1690	4,16	2060	6,88	2430	8,89	2800	5,20	3170	7,10	3540	9,22
220	6,56	590	9,28	960	6,25	1330	8,31	1700	4,21	2070	7,00	2440	8,94	2810	5,66	3180	7,15	3550	9,34
230	6,67	600	9,74	970	5,89	1340	8,38	1710	4,31	2080	7,05	2450	9,00	2820	5,76	3190	7,22	3560	9,42
240	6,30	610	9,43	980	5,94	1350	7,95	1720	4,77	2090	6,69	2460	9,04	2830	5,40	3200	7,28	3570	9,51
250	6,81	620	9,48	990	6,00	1360	8,02	1730	4,87	2100	7,15	2470	9,11	2840	5,45	3210	7,24	3580	9,62
260	6,86	630	9,12	1000	6,45	1370	8,05	1740	4,92	2110	6,78	2480	9,14	2850	5,50	3220	7,30	3590	9,67
270	6,98	640	9,17	1010	6,56	1380	8,53	1750	5,03	2120	7,25	2490	9,21	2860	5,50	3230	7,32	3600	9,72
280	6,66	650	9,68	1020	6,62	1390	8,58	1760	4,67	2130	7,29	2500	9,24	2870	5,96	3240	7,36	3610	4,11
290	6,71	660	9,74	1030	6,25	1400	8,99	1770	4,72	2140	7,36	2510	9,29	2880	6,01	3250	7,41	3620	4,43
300	6,81	670	4,06	1040	6,30	1410	9,04	1780	5,23	2150	7,46	2520	9,34	2890	6,06	3260	7,45	3630	4,48
310	7,27	680	3,90	1050	6,37	1420	8,72	1790	5,28	2160	7,49	2530	9,40	2900	6,11	3270	7,42	3640	4,53
320	7,85	690	4,41	1060	6,42	1430	8,68	1800	5,40	2170	7,15	2540	9,45	2910	6,22	3280	7,48	3650	4,16
330	7,47	700	4,11	1070	6,88	1440	8,43	1810	5,03	2180	7,20	2550	9,51	2920	6,27	3290	7,52	3660	4,21
340	7,13	710	4,62	1080	6,91	1450	8,48	1820	5,08	2190	7,66	2560	9,57	2930	5,91	3300	7,60	3670	4,26
350	7,19	720	4,24	1090	7,03	1460	8,83	1830	5,13	2200	7,71	2570	9,21	2940	5,96	3310	7,65	3680	4,33
360	7,69	730	4,30	1100	6,67	1470	8,89	1840	5,18	2210	7,76	2580	9,67	2950	6,01	3320	7,69	3690	4,79

Donde t = tiempo (segundos), D = Distancia del sensor a la columna de agua (centímetros).

Anexo 9. Datos prueba de campo con dispositivo, suelo húmico. Fuente: Elaboración propia.

t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D
3700	4,89	4070	5,96	4440	7,68	4810	8,83	5180	4,33	5550	6,22	5920	7,10	6290	8,70	6660	4,48	7030	5,45
3710	4,94	4080	6,42	4450	7,73	4820	8,83	5190	4,77	5560	5,82	5930	7,15	6300	8,38	6670	4,52	7040	5,50
3720	4,99	4090	6,49	4460	7,76	4830	9,31	5200	4,82	5570	6,28	5940	7,15	6310	8,44	6680	4,11	7050	5,55
3730	5,04	4100	6,54	4470	7,83	4840	9,36	5210	4,89	5580	5,88	5950	7,20	6320	8,80	6690	4,16	7060	5,55
3740	5,09	4110	6,57	4480	7,81	4850	8,94	5220	4,92	5590	5,91	5960	7,66	6330	8,78	6700	4,21	7070	6,00
3750	4,69	4120	6,62	4490	7,92	4860	8,99	5230	4,99	5600	5,91	5970	7,66	6340	8,83	6710	4,67	7080	6,06
3760	4,72	4130	6,64	4500	7,92	4870	9,06	5240	4,57	5610	6,44	5980	7,71	6350	8,85	6720	4,28	7090	6,11
3770	5,25	4140	6,27	4510	7,93	4880	9,04	5250	4,62	5620	6,44	5990	7,76	6360	8,89	6730	4,31	7100	6,17
3780	5,30	4150	6,27	4520	7,56	4890	9,09	5260	4,67	5630	6,49	6000	7,81	6370	8,94	6740	4,79	7110	6,17
3790	5,35	4160	6,32	4530	8,02	4900	8,68	5270	4,67	5640	6,54	6010	7,81	6380	9,00	6750	4,84	7120	5,79
3800	5,40	4170	6,78	4540	7,63	4910	9,16	5280	4,74	5650	6,54	6020	7,88	6390	9,00	6760	4,87	7130	5,86
3810	4,99	4180	6,37	4550	8,07	4920	8,75	5290	5,20	5660	6,64	6030	7,51	6400	9,06	6770	4,94	7140	5,86
3820	5,04	4190	6,83	4560	8,14	4930	9,21	5300	5,25	5670	6,23	6040	7,92	6410	9,09	6780	4,94	7150	5,91
3830	5,09	4200	6,90	4570	8,14	4940	9,26	5310	5,28	5680	6,28	6050	7,56	6420	8,68	6790	4,57	7160	5,91
3840	5,09	4210	6,88	4580	8,17	4950	9,26	5320	5,35	5690	6,28	6060	8,02	6430	9,16	6800	4,62	7170	5,96
3850	5,15	4220	6,95	4590	8,24	4960	9,31	5330	5,35	5700	6,33	6070	7,61	6440	8,73	6810	4,62	7180	6,42
3860	5,60	4230	7,00	4600	8,24	4970	9,31	5340	4,99	5710	6,79	6080	8,09	6450	9,19	6820	4,67	7190	6,47
3870	5,66	4240	7,00	4610	8,29	4980	9,36	5350	5,04	5720	6,39	6090	8,12	6460	9,21	6830	4,72	7200	6,93
3880	5,71	4250	7,05	4620	8,32	4990	9,41	5360	5,04	5730	6,85	6100	8,12	6470	9,24	6840	4,74	7210	6,52
3890	5,76	4260	6,69	4630	8,34	5000	9,41	5370	5,09	5740	6,90	6110	8,19	6480	9,31	6850	5,18	7220	6,57
3900	5,81	4270	7,15	4640	7,97	5010	9,46	5380	5,55	5750	7,36	6120	8,61	6490	9,29	6860	5,25	7230	6,62
3910	5,81	4280	6,73	4650	8,44	5020	9,51	5390	5,15	5760	6,96	6130	8,24	6500	9,36	6870	5,28	7240	6,67
3920	5,86	4290	7,20	4660	8,03	5030	9,51	5400	5,60	5770	7,00	6140	8,27	6510	9,82	6880	5,35	7250	6,27
3930	5,45	4300	6,79	4670	8,48	5040	9,57	5410	5,66	5780	7,05	6150	8,34	6520	9,40	6890	5,40	7260	6,32
3940	5,50	4310	7,25	4680	8,49	5050	9,14	5420	5,71	5790	7,10	6160	8,32	6530	9,46	6900	4,99	7270	6,32
3950	5,55	4320	7,25	4690	8,55	5060	9,62	5430	5,72	5800	6,69	6170	7,98	6540	9,50	6910	5,04	7280	6,37
3960	5,55	4330	7,30	4700	8,89	5070	9,62	5440	5,82	5810	7,15	6180	7,97	6550	9,50	6920	5,50	7290	6,83
3970	6,01	4340	7,36	4710	8,60	5080	9,67	5450	5,42	5820	6,74	6190	8,02	6560	9,57	6930	5,09	7300	6,85
3980	6,06	4350	7,41	4720	8,63	5090	4,31	5460	5,45	5830	6,79	6200	8,48	6570	9,14	6940	5,13	7310	6,90
3990	6,11	4360	7,41	4730	8,65	5100	3,90	5470	5,47	5840	7,25	6210	8,48	6580	9,60	6950	5,15	7320	6,93
4000	6,11	4370	7,46	4740	8,58	5110	4,38	5480	5,52	5850	7,25	6220	8,55	6590	9,62	6960	5,60	7330	7,00
4010	6,17	4380	7,10	4750	8,63	5120	4,46	5490	5,96	5860	7,30	6230	8,60	6600	9,65	6970	5,66	7340	7,03
4020	5,81	4390	7,10	4760	8,70	5130	4,52	5500	6,03	5870	7,36	6240	8,60	6610	9,67	6980	5,71	7350	7,03
4030	5,86	4400	7,15	4770	8,38	5140	4,16	5510	6,01	5880	7,41	6250	8,65	6620	9,70	6990	5,76	7360	6,67
4040	5,86	4410	7,61	4780	8,75	5150	4,21	5520	6,08	5890	7,46	6260	8,68	6630	4,01	7000	5,81	7370	7,13
4050	5,91	4420	7,20	4790	8,43	5160	4,69	5530	6,11	5900	7,46	6270	8,66	6640	3,90	7010	5,40	7380	6,73
4060	5,96	4430	7,68	4800	8,80	5170	4,26	5540	6,17	5910	7,51	6280	8,70	6650	4,36	7020	5,43	7390	7,19

Donde t = tiempo (segundos), D = Distancia del sensor a la columna de agua (centímetros).

Anexo 9. Datos prueba de campo con dispositivo, suelo húmico. Fuente: Elaboración propia.

t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D	t	D
7400	6,78	7770	8,02	8140	9,50	8510	4,67	8880	6,17	9250	6,73	9620	8,10	9990	8,99	10360	4,46	10730	5,66
7410	7,25	7780	8,07	8150	9,50	8520	4,67	8890	6,17	9260	7,19	9630	8,17	10000	9,04	10370	4,46	10740	5,69
7420	7,24	7790	8,53	8160	9,55	8530	4,72	8900	6,22	9270	6,78	9640	8,61	10010	9,02	10380	4,11	10750	5,69
7430	7,29	7800	8,53	8170	9,14	8540	4,72	8910	5,81	9280	7,24	9650	8,22	10020	9,09	10390	4,16	10760	5,74
7440	7,34	7810	8,58	8180	9,14	8550	4,77	8920	5,86	9290	7,24	9660	8,65	10030	9,09	10400	4,16	10770	5,81
7450	7,39	7820	8,61	8190	9,19	8560	5,23	8930	5,86	9300	7,25	9670	8,27	10040	9,09	10410	4,21	10780	5,40
7460	7,46	7830	8,99	8200	9,60	8570	5,25	8940	5,89	9310	7,30	9680	8,32	10050	8,72	10420	4,26	10790	5,45
7470	7,46	7840	8,68	8210	9,65	8580	5,30	8950	5,91	9320	7,34	9690	8,32	10060	8,73	10430	4,26	10800	5,45
7480	7,08	7850	8,73	8220	9,65	8590	5,33	8960	6,37	9330	7,34	9700	7,97	10070	8,78	10440	4,72	10810	5,48
7490	7,08	7860	8,72	8230	9,70	8600	5,33	8970	5,94	9340	7,39	9710	7,95	10080	9,17	10450	4,31	10820	5,48
7500	7,13	7870	8,36	8240	9,70	8610	5,38	8980	6,42	9350	7,44	9720	8,43	10090	9,24	10460	4,36	10830	5,54
7510	7,19	7880	8,73	8250	9,70	8620	4,98	8990	6,42	9360	7,44	9730	8,00	10100	9,23	10470	4,82	10840	5,55
7520	7,19	7890	8,43	8260	3,90	8630	5,03	9000	6,47	9370	7,51	9740	8,46	10110	9,29	10480	4,82	10850	5,60
7530	7,64	7900	8,77	8270	3,96	8640	5,04	9010	6,47	9380	7,08	9750	8,48	10120	9,29	10490	4,87	10860	6,06
7540	7,71	7910	8,48	8280	4,41	8650	5,08	9020	6,52	9390	7,13	9760	8,48	10130	9,34	10500	4,92	10870	6,05
7550	7,71	7920	8,82	8290	4,43	8660	5,08	9030	6,57	9400	7,13	9770	8,53	10140	9,34	10510	4,98	10880	6,11
7560	7,76	7930	8,87	8300	4,46	8670	5,13	9040	6,57	9410	7,13	9780	8,53	10150	9,40	10520	4,57	10890	6,17
7570	7,81	7940	8,87	8310	4,46	8680	5,13	9050	6,62	9420	7,19	9790	8,58	10160	9,40	10530	4,62	10900	6,17
7580	8,26	7950	8,94	8320	4,11	8690	5,60	9060	6,22	9430	7,64	9800	8,60	10170	9,45	10540	4,62	10910	6,22
7590	7,85	7960	8,94	8330	4,57	8700	5,60	9070	6,27	9440	7,66	9810	8,63	10180	9,50	10550	4,67	10920	6,25
7600	7,92	7970	8,99	8340	4,16	8710	5,66	9080	6,73	9450	7,64	9820	8,63	10190	9,50	10560	4,67	10930	5,86
7610	7,97	7980	9,02	8350	4,21	8720	5,69	9090	6,32	9460	7,69	9830	8,73	10200	9,50	10570	4,72	10940	5,91
7620	7,56	7990	9,09	8360	4,21	8730	5,71	9100	6,32	9470	7,75	9840	8,61	10210	9,53	10580	4,72	10950	5,89
7630	8,00	8000	9,09	8370	4,26	8740	5,74	9110	6,78	9480	7,76	9850	8,72	10220	9,14	10590	4,77	10960	5,94
7640	7,61	8010	9,14	8380	4,26	8750	5,81	9120	6,37	9490	7,80	9860	8,70	10230	9,60	10600	5,23	10970	5,94
7650	8,05	8020	8,72	8390	4,31	8760	5,38	9130	6,83	9500	7,81	9870	8,38	10240	9,19	10610	5,30	10980	6,00
7660	8,07	8030	8,73	8400	4,31	8770	5,84	9140	6,83	9510	7,87	9880	8,73	10250	9,60	10620	5,28	10990	6,42
7670	8,10	8040	8,73	8410	4,36	8780	5,43	9150	6,88	9520	7,92	9890	8,41	10260	9,65	10630	5,33	11000	6,47
7680	8,15	8050	8,77	8420	4,84	8790	5,45	9160	6,88	9530	7,49	9900	8,77	10270	9,65	10640	5,40	11010	6,52
7690	8,63	8060	9,24	8430	4,82	8800	5,50	9170	6,93	9540	7,51	9910	8,77	10280	9,70	10650	4,98	11020	6,52
7700	8,21	8070	9,24	8440	4,89	8810	5,48	9180	6,98	9550	7,54	9920	8,48	10290	9,70	10660	5,03	11030	6,57
7710	8,27	8080	9,28	8450	4,92	8820	5,55	9190	6,98	9560	7,54	9930	8,83	10300	3,96	10670	5,03	11040	6,62
7720	8,32	8090	9,75	8460	4,52	8830	5,54	9200	7,03	9570	7,59	9940	8,82	10310	4,31	10680	5,08	11050	6,62
7730	8,31	8100	9,34	8470	4,57	8840	5,59	9210	7,03	9580	7,61	9950	8,87	10320	3,90	10690	5,08	11060	6,25
7740	7,95	8110	9,40	8480	5,03	8850	6,06	9220	6,67	9590	7,59	9960	8,89	10330	3,90	10700	5,13	11070	6,27
7750	7,97	8120	9,85	8490	4,62	8860	6,06	9230	7,13	9600	7,64	9970	8,94	10340	3,96	10710	5,13	11080	6,32
7760	8,02	8130	9,45	8500	4,62	8870	6,11	9240	6,73	9610	8,12	9980	9,40	10350	4,41	10720	5,18	11090	6,32

Donde t = tiempo (segundos), D = Distancia del sensor a la columna de agua (centímetros).

Anexo 9. Datos prueba de campo con dispositivo, suelo húmico. Fuente: Elaboración propia.

t	D	t	D	t	D
11100	6,37	11470	7,85	11840	8,48
11110	6,37	11480	7,90	11850	8,82
11120	6,42	11490	7,90	11860	8,82
11130	6,83	11500	7,53		
11140	6,88	11510	7,54		
11150	6,93	11520	7,59		
11160	6,93	11530	7,59		
11170	6,98	11540	8,05		
11180	7,03	11550	8,10		
11190	7,03	11560	8,10		
11200	6,67	11570	8,15		
11210	7,13	11580	8,15		
11220	6,71	11590	8,21		
11230	6,73	11600	8,21		
11240	6,78	11610	8,26		
11250	6,78	11620	8,31		
11260	6,83	11630	8,31		
11270	7,29	11640	8,36		
11280	7,29	11650	7,95		
11290	7,34	11660	8,00		
11300	7,39	11670	8,00		
11310	7,39	11680	8,05		
11320	7,85	11690	8,05		
11330	7,49	11700	8,51		
11340	7,08	11710	8,51		
11350	7,54	11720	8,56		
11360	7,13	11730	8,56		
11370	7,13	11740	8,61		
11380	7,19	11750	8,65		
11390	7,19	11760	8,65		
11400	7,24	11770	8,65		
11410	7,24	11780	8,70		
11420	7,69	11790	8,66		
11430	7,75	11800	8,36		
11440	7,76	11810	8,41		
11450	7,81	11820	8,41		
11460	7,80	11830	8,77		

Donde t = tiempo (segundos), D = Distancia del sensor a la columna de agua (centímetros).